TOP SECRET

SIGNATURE RECORD AND COVER SHEET

DOCUMENT DESCRIPTION

REGISTRY

25X1

25X1

[redacted]

NOTICE OF DETACHMENT

WHEN THIS FORM IS DETACHED FROM **TOP SECRET** MATERIAL IT WILL BE COMPLETED IN THE APPROPRIATE SPACES BELOW AND TRANSMITTED TO **CENTRAL TOP SECRET CONTROL** FOR RECORD.

The Top Secret material detached from this form was:

DOWNGRADED

DESTROYED

DISPATCHED (OUTSIDE CIA) TO: ____________

BY: ____________ (SIGNATURE)

____________ (OFFICE) (DATE)

TOP SECRET

FORM NO. 38.13 PREVIOUS EDITIONS NOT TO BE USED
APR 1948

25X1

25X1

25X1

Subject: BREITBAND KABEL (COAXIAL CABLES)

25X1

2. GENERAL DESCRIPTION OF GERMAN COAXIAL CABLES: There were several types of coaxial cables in use in Germany before and during the war, all of which allowed the transmission of 200 individual telephone conversations simultaneously. Each conversation was conducted on a frequency, which was separated from the other by 3 kilocycles per second.

Every type of cable had a solid copper core with a diameter of 5 mm. The outer casings were either made from copper bands with an inner diameter of 18 mm. or from aluminium bands with a minimum inner diameter of 19 mm.

For the insulation different methods were used. Cables produced by SIEMENS had Styroflex-coils and Styroflex-foils, whereas cables produced by the AEG had insulating disks.

The impedance (Wellenwiderstand) of all cables was between 68 and 73 Ohm with an attenuation of about 0.16 Neper/Km. at 1 MHz (1000 kilocycles per second). For other frequencies the attenuation is in proportion to the square root of the frequency. The transmission speed was about 275 000 km. per second.

Cables in operation in Germany before the war were used for telephone communications at a frequency band between 90 and 690 kHz and for the transmission of television on a frequency band between 1 and 4 MHz. Every 35 km. hand operated booster stations were necessary, interspaced half-way with small unmanned automatic booster stations. Both telephone and television frequencies were amplified at the main stations with the frequency used for television again amplified at the intermittant booster stations. At no times were these cables used

/simultaneously

simultaneously for the transmission of telephone communications and television programmes.

3. [CABLES IN USE IN GERMANY BEFORE THE WAR:] The only cable used before the war was the one from BERLIN to LEIPZIG with a branch-line to the BROCKEN mountain in the HARZ. Several other lines were in the course of construction between BERLIN and HAMBURG, BERLIN and FRANKFURT/MAIN and the extension of the BERLIN to LEIPZIG line as far as MUNICH, but 25X1 [redacted] 25X1 these were never completed.

The BERLIN to LEIPZIG line was only used once before the war for the transmission of a television programme. During the war this cable was exclusively used for telephone purposes. The attenuation figure of this cable was 0.16 Neper/km. per 1 MHz = 0.32 Neper/km. per 4 MHz. These figures were taken from the cable in situation.

25X1 [redacted] 25X1 a hand operated booster station was situated at MUEHRO (M53/E08) and one of the unmanned automatic stations at BIAS (M52/D97).

4. [RUSSIAN EXPERIENCE WITH THE DISMANTLED CABLES:] After all the cables and booster stations in Germany had been dismantled by the Russians after the war, they planned to increase the transmission capacity of the cables to 8 MHz. After extensive tests had been carried out with the cables, it was found that they were unsuited for transmissions at 8 MHz, especially since the inner reflections of the cable had become so large owing to damage sustained during the dismantling, that the reproduction of the televised picture at more than the original 4 MHz became blurred.

Owing to the fact that it is not always possible in Russia to link up the booster stations to the grid, it was planned by the Russians to have a separate insulated and earthed core in the coaxial cable for the transmission of high tension. However, this plan was dropped at the time 25X1 and [redacted] does not know how the Russians will overcome the difficulty, although the original plan is feasible.

/5.

TOP SECRET

5. TEST FIGURES OF COAXIAL CABLES PRODUCED BETWEEN 1946 AND 1947: We attach as Annexure 'A' a list of figures [redacted] which give test figures of coaxial cables produced by the former AEG, now known as KABELWERK OBERSPREE, BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE; (Russian Sector), Wilhelminenhof Str. The figures are for 4 different cables, each of which is insulated by a different method.

25X1

6. DESCRIPTION OF A COAXIAL CABLE PRODUCED IN OCT 48: We attach as Annexure 'B' a list giving general details of a new cable, which was produced by the KABELWERK OBERSPREE in 1948. It is believed that the cable was actually completed in OCT 48 and taken by the Russians to an unknown destination in Russia.

This new type of cable requires [redacted] booster stations at intervals of 6 to 8 kms.

25X1

25X1 [redacted]

Copies 1/10 - Addressee
11/13 - File

25X1

[redacted]

Annexure 'A'

MESSUNGEN AN BREITBANDKABELN FRUEHERER PRODUKTION.

Gemessene elektrische Eigenschaften von koaxialen Leitungen. Innenleiter 2.6 mm Ø, aeusserer Rohrleiter 9.4 mm innerer Ø (Bemerkungen: 1 pF = 1 picofarad = 10^{-12} Farad, 1 MHz = 1 Megahertz = 1000 kilocykles per second).

Isolation	Kapazitaet C pF/m	Wellenwiderstand Z Ohm	Dielektrizitaetskonst. ε	Daempfung β Neper/km bei 1 MHz
Frequentascheiben	54.0	68.5	1.22	0.33
Styroflex-Kordel und -Folie	53.5	68.9	1.21	0.31
Polyaethylenscheiben 30 mm Abstand	49.5	71.0	1.11	0.30
Toritul-Stegscheiben 30 mm Abstand	47.5	72.6	1.07	0.30

Annexure 'B'

B R E I T B A N D K A B E L

Das Kabel besteht aus 7 einzelnen koaxialen Leitungen von folgendem Aufbau:

	Durchmesser mm	Gewicht kg/km fuer 7 Leitungen
Innerer Leiter, blanker, harter Kupferdraht	2.6	346
darueber Calitscheiben, 10.2 mm Ø, 2.2 mm dick, 2.7 mm Bohrung, in 25 mm Abstand		119
Aeusserer Leiter, nahtlos gezogener Mantel aus reinstem Aluminium (99.99 Al)	innen 11.0 aussen 13.2 bis 13.4	870
Zwei Lagen Al-Fe-Band 12.5 x 0.2 mm, mit 2 mm Luecke aufgebracht. Luecken beider Lagen um halbe Bandbreite verschoben	14.2	820
Zwei Lagen Papier, 0.15 bis 0.16 mm mit 20% Ueberlappung	15.0	107
		2262

Eine dieser Leitungen bildet die Mitte des Kabels, die uebrigen sechs werden darum mit Rechtsdrall von 1500 mm Drall-Laenge verseilt.

Darueber kommen mehrere Lagen getraenktes Papier, abwechseln mit Bitumen, und impraegnierten Jute.

Aeusserer Durchmesser	56.6 mm
Gesamtgewicht	3563 kg per km
Fabrikationslaenge:	etwa 450 m

25X1 [redacted]

Subject: WERK "H F" (OBERSPREEWERK) BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE, Ostend Strasse 1-5

1.
25X1 [redacted]
2.

25X1 [redacted]

Report on scientific research and development tasks carried out - 18 sheets

Description and instructions for use of the valve voltage meter OSW Type 2407a - 10 sheets

Technical details for a mercury high-pressure lamp for use with all types of electric current - 1 sheet

Description of the installation for th automatic 'kataphoresieren von Kathodenwendeln' - 5 sheets

Works instruction for the production of insulating pastes - 3 sheets

25X1 [redacted]

Test results of the oscillograph OSW Type 2396-004 - 4 sheets

Works Standard 117-1 for aluminium oxyde - 2 sheets

List of laboratory equipment belonging to the BUERO FUER NACHRICHTENWESEN NTO MPSS - 26 sheets

List of machinery belonging to the BUERO FUER NACHRICHTENWESEN NTO MPSS - 12 sheets

Estimate of the production capacity of the machinery - 5 sheets

Report on the application of new production methods during the month of NOV 49 - 4 sheets

Report No. 24 giving details of new machines installed during the 4th Quarter 1949 - 2 sheets

25X1 [redacted]

Report No. 26 giving details of new machines installed during the 4th Quarter 1949 - 2 sheets

25X1 [redacted] Report on the production per head for the month of OCT 49 - 1 sheet

Offer made for confirmation of the new cost estimate for types 1a and 1b (TBN), already confirmed in the production plan for 1949 - 9 sheets

Nomenclature and proportional share of the products made under the production plan for 1949 and 1950 - 11 sheets

Monthly report on the production of new types - 5 sheets

Statement giving details on the execution of reparation orders for the 2nd six months of 1949 as per 30 NOV 49 - 1 sheet

Statement giving details on the execution of reparation orders for the 2nd six months of 1949 as per 10 DEC 49 - 1 sheet

Statement giving details on the delivery of products to the District of Koepenick between 1 JAN 49 and 30 NOV 49 - 1 sheet

Minutes of a meeting with regard to measuring instruments - 3 sheets

First report of the stock taking commission for the WERK "H F", dated 20 NOV 49 - 2 sheets

Second report of the stock taking commission, dated 7 DEC 49 - 3 sheets

Third report of the stock taking commission, dated 7 DEC 49 - 3 sheets

Minutes of a meeting with regard to measuring instruments dated 7 DEC 49 - 3 sheets

25X1 [redacted]

25X1 [redacted] Subject: Passing of wave meters OSW Type 2407 - 2 sheets

25X1 [redacted]

Subject: Passing of wave meters OSW Type 2414a - 2 sheets

TOP SECRET

25X1 [redacted] Russian GLYBIN by the GEMA GKB/TECHNISCHE VERWALTUNG, KOEPENICK - Subject: Estimate for the 1950 production plan - 8 sheets

25X1 [redacted] FABRIK ISOLIERTER DRAEHTE, BERLIN S.O. 16, Runge Strasse 25/27 with regard to storage - 1 sheet

25X1 [redacted] legal position of the works police - 1 sheet

25X1 [redacted] reparation orders (addressee unknown) - 1 sheet

25X1 [redacted] Administration for Military orders and production G.S.O.W.G., BERLIN, Prezlauer Allee 60 - 1 sheet

25X1 [redacted]

Distribution: Copies 1-10 Addressee
11-13 File

25X1 [redacted]

25X1

[redacted]

25X1

[redacted]

Subject: WERK "H F" (OBERSPREEWERK), BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE, Ostend Strasse 1-5.

25X1

[redacted]

25X1

[redacted] samples, which were produced by BET NTO MPSS and sent to MOSCOW-FRJASINO - 11 sheets.

25X1

[redacted]

and were alleged to contain instruments and appliances built by the WERK "H F" during 1949 specially for the Institute Golzowa.

25X1

[redacted]

25X1

[redacted]

Copies 1/10 - Addressee
" 11/13 - File

25X1

[redacted]

25X1 [redacted]

25X1 [redacted]

Subject: THURINGISCHE ZELLWOLLE, SCHWARZA (M51/J53)

25X1 [redacted]

25X1 2. NEWS ABOUT THE MOVEMENTS OF SOME OF THE LEADING PERSONALITIES: [redacted]
25X1 [redacted] Herr Dr. CORRENZ, Herr Dr. KLARE and Ing. W. BAUSSMANN returned from Poland on 15 January 1950 after having stayed at LODZ, WARSAW and the former LANDSBERG (053/W08). [redacted] they went to Poland for technical discussions with regard to the re-building of a former I.G. plant for the production of Perlon.

25X1 25X1 25X1

3. DISTRIBUTION OF THE SCHWARZA PRODUCTION: [redacted]
SCHWARZA produces an artificial fibre known under the trade-name of "CORD SEIDE". This fibre is ideally suited for weaving into parachute fabrics and this may be the reason why practically the entire production is sent to Russia. The fibre is wound on cones, packed into wooden cases marked with Russian letters and then despatched by Russian lorries with the indicator number M.

25X1 [redacted]

25X1 [redacted]

25X1

[redacted]

25X1

[redacted]

Subject:- WERK "H F" (OBERSPREEWERK), BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE, Ostend Strasse 1 - 5.

25X1 [redacted]

25X1 [redacted]

Technical description of the 'Polarkoordinat-Oszillograph' - 24 sheets

Test records for the 'Polarkoordinat-Oszillograph' - 4 sheets

Description of OSW Type 2584 - 2 sheets

Description of OSW 2589 - 2 sheets

Description of OSW Type 2651 - 4 sheets

Description of OSW Type 2654 - 4 sheets

Description of OSW Type 2620 - 2 sheets

Description of OSW Type 2668 - 2 sheets

Description of OSW Type 2663 - 2 sheets

Description of OSW Type 2525a - 2 sheets

25X1 [redacted]

Description of OSW Type 2623 - 2 sheets

Description of OSW Type 2624 - 1 sheet

Description of OSW Type 2358 or 2558 - 1 sheet

Description of OSW Type 2576 - 3 sheets

Description of OSW Type 2644 - 3 sheets

Description of OSW Type 2647 - 3 sheets

Technical specification for task No.1 of the 1950 production plan: Oscillograph for decimeter waves OSW Type 2702 - 2 sheets

/2....

Technical specification for task No. 2 of the 1950 production plan: Continuation of the development of the tyratron valve filled with hydrogen - 1 sheet.

25X1

Technical specification for task No. 3 of the 1950 production plan: 'Laufzeit-Oszillograph zur Ueberwachung von Dauerstrich Dezimeterwellensendern' - 1 sheet.

Techical specification for task No. 5 of the 1950 production plan: Development of a decimeter wave oscillographic valve for use in a pulse transmitter (Impulssender) with concentric supply of energy to the 'Messplatte' - 1 sheet

Technical specification for task No. 7 of the 1950 production plan: Development of a 'Polarkoordinations-roehre fuer aperiodisch kippenden' oscillographs - 1 sheet.

Technical specification for task No. 8 of the 1950 production plan: Development of a mercury high pressure valve for an output of 1 kw with 'Starkfoliendurchfuehrung' - 1 sheet

Technical specification for task No. 9 of the 1950 production plan: Research into the possibility of the production of a mercury high pressure valve with an output of 2 kw with 'Molybdaen-Scheibendurchfuehrung' - 1 sheet.

25X1

Technical specification for task No. 15 of the 1950 production plan: Cold cathode ray oscillograph - 1 sheet.

Technical specification for task No. 16 of the 1950 production plan: Frequency analysor - 1 sheet.

25X1

 TOP SECRET

25X1 [redacted] Explanation on the completion of scientific research and development work undertaken for task 1 of the 1949 production plan - 3 sheets.

Report on the inter-departmental production competition during 1949 and prospects for 1950 - 4 sheets.

Interim report on scientific research and development work undertaken for task No. 4 of the 1949 production plan - 2 sheets.

Report No. 29, compiled by the stock-taking commission - 2 sheets.

25X1 [redacted] Report No. 30, compiled by the stock-taking commission - 2 sheets.

Plan for scientific research and development work to be undertaken by the WERK "H F" during 1950 - 3 sheets

Plan for scientific research and development work to be undertaken by the WERK "H F" during 1950 - 4 sheets.

25X1 [redacted]

25X1 [redacted] additions to the 1950 production plan - 3 sheets.

Plan for organisational and technical steps to be taken by the WERK "H F" during 1950 - 2 sheets.

Report on the realisation of the plan for organisational and technical steps taken during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

25X1 [redacted] Return on the production capacity per head during the month of NOV 49 - 1 sheet.

Report on the introduction of new production methods during the month of DEC 49 - 7 sheets.

Report on the completion of the plan for reparation deliveries for the period from 1 JAN 49 to 31 DEC 49 - 1 sheet.

/4....

TOP SECRET

25X1 [redacted] Instructions issued with regard to special accounting of money and other expenditure by the TBN for the month of December 1949 - 2 sheets.

Report on the execution of the plan for monetary investments - 1 sheet.

Report on the execution of basic repairs carried out during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Report on the execution of the plan for basic repairs to be carried out during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Report on the execution of the plan for capital expenditure during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Programme for the installation of special instruments: Capital investment, work and repair for organising the production of instruments - 2 sheets.

Agreement reached with regard to guaranteeing the quality and the financial accounting for thermionic valves - 6 sheets.

25X1 [redacted] output and standards - 4 sheets.

List giving details of required westmark amounts for the completion of the tasks set under the production plan - 1 sheet.

Estimated turn-over during 1950 - 1 sheet.

Proposed disposal of the production during 1950 - 1 sheet.

25X1
25X1 [redacted] alteration of the technical specification for PRK 2 and PRK 4 - 3 sheets.

Estimated consumption of precious metals during 1950 - 1 sheet.

25X1 [redacted] the production of pure nickel - 3 sheets.

Instructions issued with particular reference to the WERK "H F" - 2 sheets.

Specification of delivery note No. 895229 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895230 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895222 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895223 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895226 - 1 sheet.

/5....

TOP SECRET

25X1 [redacted] Administration for Reparation Deliveries, Soviet Control Commission in Germany, for a final amount of 2. 74 East Marks - 1 sheet.

25X1 [redacted] details of remittances effected to creditors and by debtors before the currency exchange - 1 sheet.

25X1 [redacted] current account of the SOVIET A.G. "KABEL" No. 103-00 as per 1 December 1949 - 1 sheet.

25X1 [redacted] current account of the SOVIET A.G. "KABEL" No. 104-01 as per 1 December 1949 - 1 sheet.

25X1 [redacted] SOVIET A.G. "KABEL" to the WERK "H F" with regard to the possibility of supplying a set of duplicate tools [redacted] 25X1

25X1 [redacted].

DISTRIBUTION:

25X1 [redacted]

25X1



25X1



SUBJECT: <u>WERK "H F" (OBERSPREEWERK), BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE, Ostendstrasse 1-5</u>

25X1



2. <u>PROPOSED OPENING OF A SELLING BRANCH IN THE WEST SECTOR</u>: It is planned by the Russian Management of the plant to open a selling branch in the Western Sectors of BERLIN. This branch is to sell OSW products for Westmarks and the proceeds of such sales are to finance the purchases of raw-materials urgently needed for the completion of reparation orders.

25X1 3. <u>DISSOLOUTION OF THE "STAB"</u>: 

25X1 [redacted] the "STAB" has been dissolved. The Russian staff has returned to MOSCOW, but it is not known to which Ministry. Only the cars with their German drivers have been taken overy by the WERK "H F".

4. <u>DANGER OF THE COLLAPSE OF THE 6TH FLOOR</u>: It is reported that the 6th floor is in danger of collapsing. There are 40 heavy machines operated on this floor and walls as well as floor show cracks. The German Building Police (Bau-Polizei) recommended already in April 1949 the closing down of this floor, but no notice was taken. In the meantime the cracks have become larger and part of the room below had to be closed down owing to the falling down of part of the concrete ceiling. It is now planned to transfer all the machines from the 6th floor to the 3rd floor of the NEF building.

25X1

Annexure 'A'

25X1

.... Nun zu unserer Sylvesterfeier, die wir diesmal ganz gross begangen haben. Diesmal sind wir vom Schema F abgegangen und feierten Sylvester mit noch einem Ehepaar, einem Junggesellen und unserer Dolmetscherin in einem der besten Restaurants in Leningrad, dem "Metropol". Man musste vorher, wie bei uns in Deutschland, einen Tisch bestellen. Es kostete pro Person die Kleinigkeit von 150 Rubeln; in diesem Preis war aber alles enthalten, was man trank und ass und zwar in solcher Reichhaltigkeit, dass wir bequem noch 6 Personen haetten satt bekommen. - Um 11 Uhr abends war Einlass in den wundervoll geschmueckten grossen Saal. Der Saal ist an und fuer sich schon herrlich anzusehen: grosse Kristalllueester funkeln an der Decke, die Riesenfenster sind mit blauen Damastgardinen behangen, 4 enorm grosse Weihnachtsbaeume standen geschmueckt in den Ecken. Ueber dem Podium der sehr guten Jazzkapelle ein bunt illuminierter Spruch: .... (Russische Buchstaben), was gutes neues Jahr heisst. Die weiss gedeckten Tische waren wie im Schlaraffenland bestellt mit den herrlichsten Dingen. Damit ihr einmal einen Begriff bekommt, was fuer jeden einzelnen bestimmt war, nachstehend das Menue:

Getraenke:
Sekt, suess ½ Flasche
Portwein 100 gr.
Wodka 100 gr.

Fruechte:
Aepfel, Mandarinen
Birnen, Weintrauben

Kalte Platte:
Kaviar
Balik m.Zitrone (Bester Raeucherfisch)
Lachs
Butter
Stoehr im Aspik
Huhn in Majonaise
Salat "Neujahr"
Gefluegelpastete
Weiss- und Schwarzbrot

Warme Speisen:
Forelle in holl.Sauce
Filetbraten "Metropol"
Schlagsahne mit Keks

Ausser den warmen Speisen war bereits alles fuer die betreffende Personenzahl, fuer die der Tisch bestellt war, eingeteilt und aufgebaut.

Die 3 Sektflaschen, die verschiedenen Glaeser, die silbernen Platten mit all den Herrlichkeiten und die hochgetuermte Obstschale, all das bot ein bezauberndes Bild, da schaetzungsweise 60 bis 70 Tische in dieser Weise aufgebaut waren. - Um 12 Uhr begann die Kapelle zu spiehlen, nachdem all aufgestanden waren und sich ein gutes neues Jahr gewuenscht hatten. Die Mitte des Saales war frei zum Tanz. Die Damen trugen alle lange Abendkleider, die Herren Uniformen oder Gesellschaftsanzug. Wir tanzten jeden Tanz und die Russen forderten fleissig auch unsere Damen zum Tanz.

Dazwischen versuchten wir immer wieder, all der lukullischen Genuesse Herr zu werden, was uns aber beim besten Willen nicht gelang. Eine gute Saengerin und ein ebensolcher Saenger sorgten fuer Stimmung, die auch wirklich glaenzend war. Viel zu frueh war es ploetzlich 5 Uhr und Schluss. Nun ging es in die Pelze und hinaus in die klare Winterluft (18°). Zwei Taxis brachten uns in unser Haus.

Es war einer der schoensten Tage, die man nicht vergisst. ......

25X1 [redacted]

25X1 [redacted]

SUBJECT: B.T.B. (VERSUCHS-UND FORSCHUNGS-INSTITUT DES MINISTERIUMS FUER AUTOMOBIL INDUSTRIE, MOSCOW), BERLIN-ADLERSHOF (Russian Sector), Rudower Chaussee 26-30

25X1 [redacted]

2. ORIGINAL CARBON COPIES OF DOCUMENTS DESPATCHED TO RUSSIA: During the last few days of the existence of B.T.B. SIMILAR received instructions to destroy by fire all old records held on the files relating to tasks dealt with in 1945. [redacted] a fairly representative selection of these documents [redacted] are forwarded [redacted] per the following details:

25X1
25X1
25X1

25X1 [redacted] Aufbau und Durchfuehrung einer Schadensforschung im Motorenbetrieb und ihre praktische Auswertung zur Schadenverhuetung - 5 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Vor - und Nachteile der verschiedenen Verbrennungsverfahren beim Fahrzeugdieselmotor - 24 technical drawings. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Die Oelreinigung im Kraftfahrzeugmotor (Faserstoff-Oelreiniger, der einen Wechsel des Motorenoels ueberfluessig macht). - 21 sheets of text (pages 1 to 34 of the text are missing), 48 illustrations.

25X1 [redacted] Betrieb von Fahrzeug-Zweitaktmotoren mit Fluessiggas - 19 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Versuche ueber den zeitlichen Ablauf der Spuehlstroemung - 7 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Hilfsmittel zur Steigerung der Feuerungsleistung und des Feuerungswirkungsgrades (Feuerraumgestaltung, Luftsteuerung und Wirbelung) - 44 sheets of text, 29 illustrations and 14 negatives.

25X1 [redacted] Die Waermebehandlung als entscheidender Faktor fuer die Festigkeit hochwertiger Motorenteile aus Stahl. - 28 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted]

TOP SECRET

25X1 [redacted] Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstaetten an die Brenneigenschaften des Schwelkokses - 66 sheets of text and 28 illustrations.

25X1 [redacted] Erfindungen auf dem Gebiet der Gemischbildung und Verbrennungsverfahren fuer Verbrennungsmotoren, zusammengestellt an Hand der Patentliteratur - 84 sheets of text.

25X1 [redacted] Ueberblick ueber die Entwicklung des Kohlenstaubmotors - 121 sheets of text. The illustrations to the report are missing.

25X1 [redacted] Dieselelektrische Antriebe fuer Strassen Lastzuege - 35 sheets of text. The illustrations to the report are missing.

25X1 [redacted] Konstruktion und Wirkungsweise moderner Fahrzeugmotorenvergaser: 1st Interim Report - 25 sheets of text and 15 illustrations.

25X1 [redacted] Messung von Klopfschwingungen - 32 sheets of text and 47 illustrations.

25X1 [redacted] Messen von Ventilfederschwingungen - 14 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Klopffestigkeit und Zuendwilligkeit (Anerkannte Ergebnisse und ungeloeste Aufgaben der Forschung) - 107 sheets of text and 38 illustrations.

25X1 [redacted] Die Entwicklung des Fahrzeug-Dieselmotors in Deutschland - 56 illustrations (illustrations No. 33 and 34 are missing). The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Haengende oder stehende Ventile? - 39 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Kolbenfragen im Fahrzeugmotorenbau - 3 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Richtlinien fuer die Pruefung von Motoren - 29 sheets of text and 10 illustrations.

25X1 [redacted] Der vollkommene Ausgleich aller beschleunigt bewegten Massen bei Mehrzylinder-Kolbenmotoren zwecks Vermeidung von Erschuetterungen - 15 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Gesamtschwefel, aktiven Schwefel, Schwefel-Kohlenstoff und Thiophen in Kraftstoffen - 17 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Festigkeitsrechnung bei ungleichfoermiger Beanspruchung - 24 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Berechnung von Brennstoffduesen, insbesondere der Bauart l'Orange - 19 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Versuche an Generatorfahrzeugen mit Aufladung - 5 illustrations. The text of the report and some of the illustrations are missing.

25X1 [redacted] Die Grundsaetze fuer die Typung im allgemeinen Verbrennungsmotorenbau - 5 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted]

25X1 [redacted] Berechnung und Entwicklung von Zahnraedergetrieben fuer Leichtmotoren - 17 illustrations and 1 table of figures. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Umlaufende Kuehler, insbesondere fuer Fahrzeuge mit Dampfantrieb - 28 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Die Hilfsmachinen bei Dampffahrzeugen und ihr zweckmaessigster Antrieb - 52 sheets of text. The illustrations to the report are missing.

25X1 [redacted] Ueber die Beziehungen zwischen der Beschaffenheit der Oberflaeche von Konstruktionsteilen eines Motors und dem Verhalten im Betriebe - 76 sheets of text and 8 illustrations.

25X1 [redacted] Die messende Erfassung der Oberflaecheneigenschaften von Motorteilen durch Mikrountersuchung - 11 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Die Entwicklung hochfester Aluminium-Knetlegierungen in ihrer Beziehung zu den Werkstoffproblemen des Motorenbaues - 69 sheets of text and 27 illustrations.

25X1 [redacted] Spannungskorrosion - 6 illustrations. The text of the report and illustrations 1, 2, 3 and 8 are missing.

25X1 [redacted] Die Darstellung der Zustandsgroessen von Benzol und Benzoldampf im IS-Diagramm - 1 illustration and 6 tables of figures. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] ufbau des Siemens-Oszillographen - 1 illustration. The text of the report and illustrations 1 to 15 are missing.

25X1 [redacted] Anwendungsgebiete des Elektrokarrens - 2 illustrations. The text of the report and the remaining illustrations are missing.

25X1 [redacted] Schaltgeraete fuer Obusse, Elektrokarren und Elektrolastwagen - 39 illustrations. The text of the report and illustrations 6, 21 to 25, 29, 36, 37, 45 and 46 are missing.

25X1 [redacted] Fahrbares Laboratorium zur Untersuchung von Kraftstoff und Schmierstoffen - 4 illustrations. The text of the report is missing.

25X1 [redacted] Bewertung von Schmieroelen vom Motorischen Standpunkt aus - 1 sheet of text (introduction only) and 13 illustrations. The rest of the text is missing.

25X1 [redacted] Der Einfluss von Schmieroelen auf das Einlaufen von Motoren und das Anlassen der Motoren in der Kaelte - 31 sheets of text and 6 illustrations. Illustrations 4, 5 and 8 are missing.

25X1 [redacted] Untersuchungen ueber die Beanspruchung von Kurbelzapfen und der Treibstangenlager von schnelllaufenden Dampfmaschinen fuer schwere Strassenfahrzeuge - 33 sheets of text, 14 illustrations and 2 tables of figures.

25X1 [redacted] rehzahlenbegrenzung durch die Ventilsteuerungen bei Viertakt-Ottomotoren - 29 sheets of text. The illustrations to the report are missing.

25X1 [redacted] Untersuchung ueber die Annaeherung des wirklichen Motors und die theoretisch moegliche Grenze der Brennstoffausnutzung. 31 illustrations and 31 negatives. The text of the report is missing.

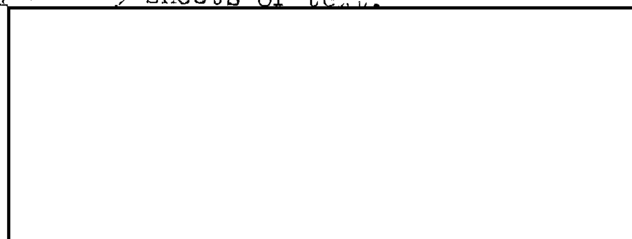
25X1 [redacted]

TOP SECRET

4

25X1  [redacted] Modellversuche ueber die Stroemung der Spuehlluft im Zylinder von Zweitaktmotoren - 14 illustrations the text of the report is missing.

25X1  [redacted] Geschichte der deutschen Fahrzeugmotoren-Forschung Part I paragraph C - 9 sheets of text.


[redacted]

25X1

25X1


[redacted]

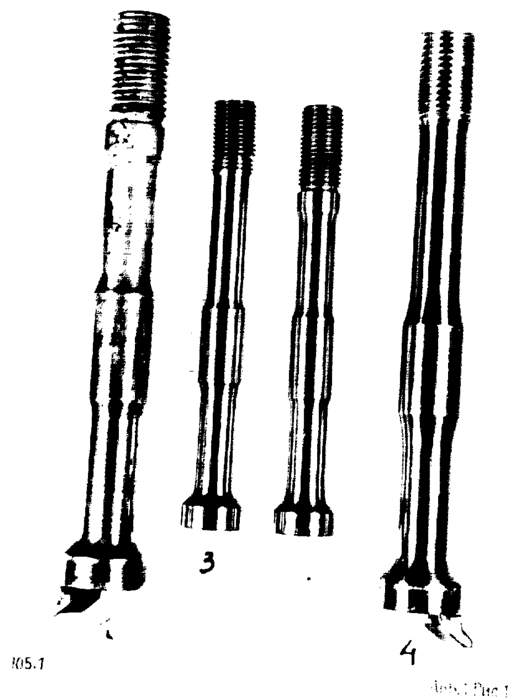


Abb.1 Рис.1

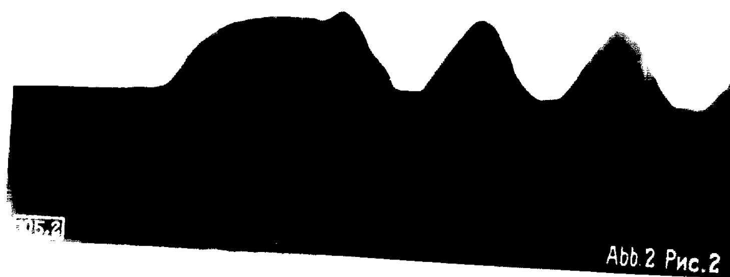


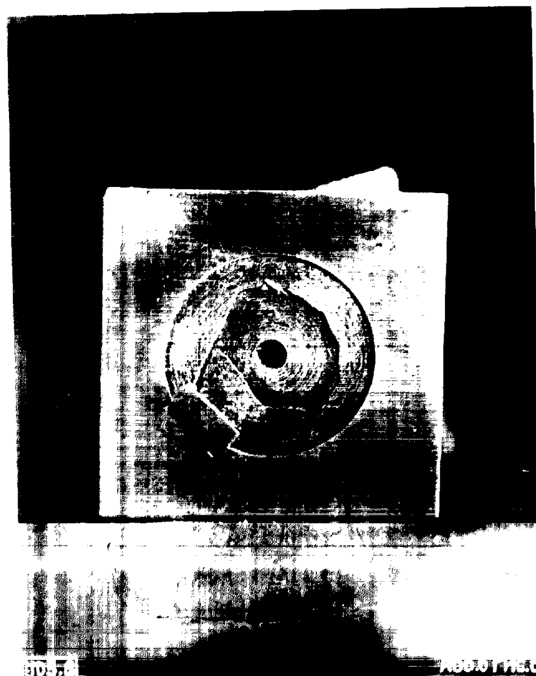
Abb.2 Рис.2



Abb.3 Рис.3



105.5 Рис.5



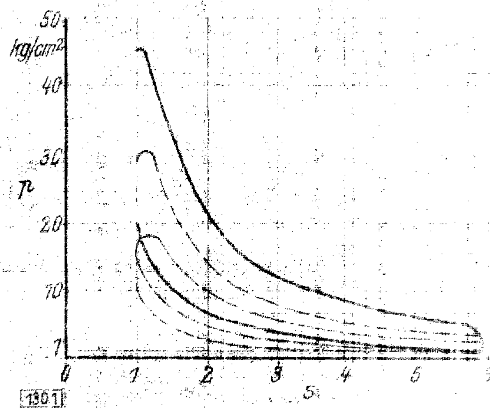


Abb.1 Рис.1

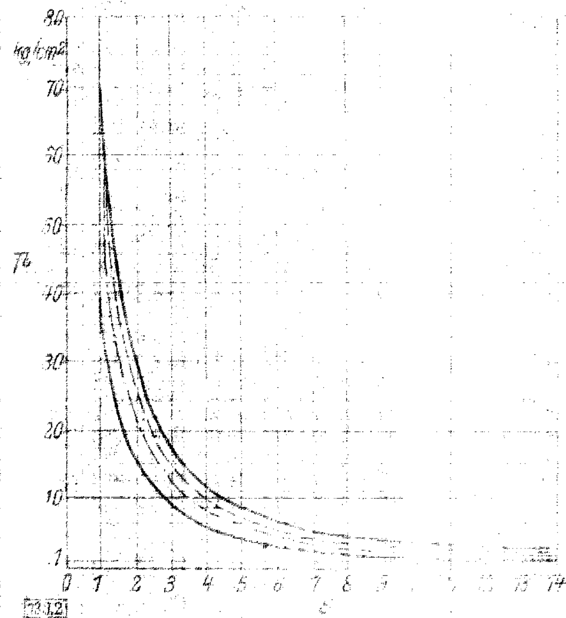


Abb.2 Рис.2

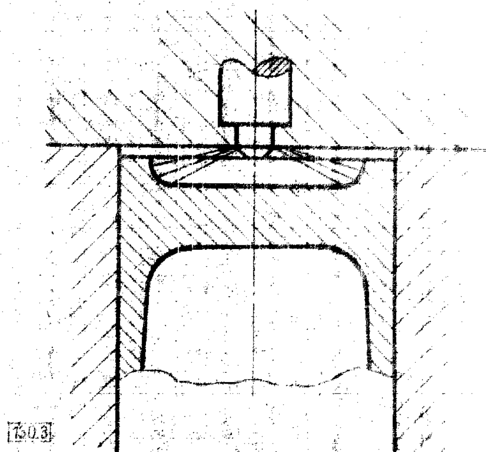


Abb 3 Рис 3

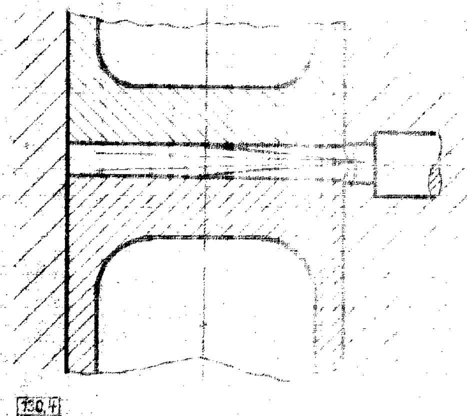
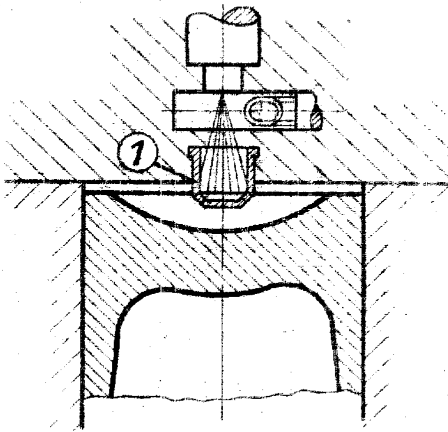


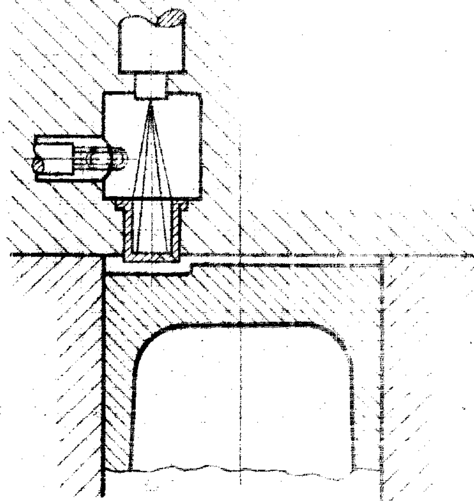
Abb 4 Рис.4

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



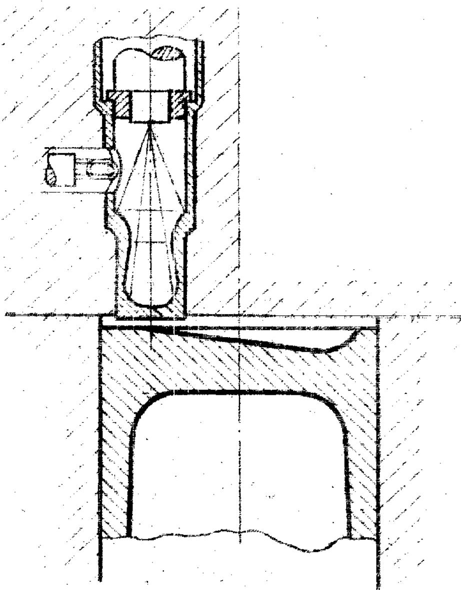
130.5

Abb.5 Рис.5



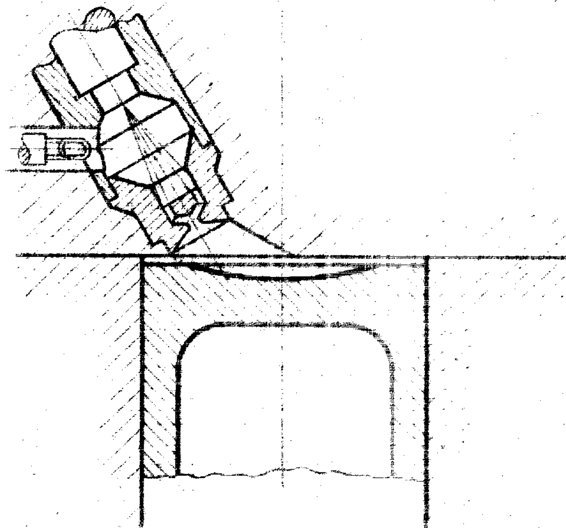
130.6/I

Abb.6/I Рис.6/I



130.6/II

Abb.6/II Рис.6/II



130.7

Abb.7 Рис.7

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

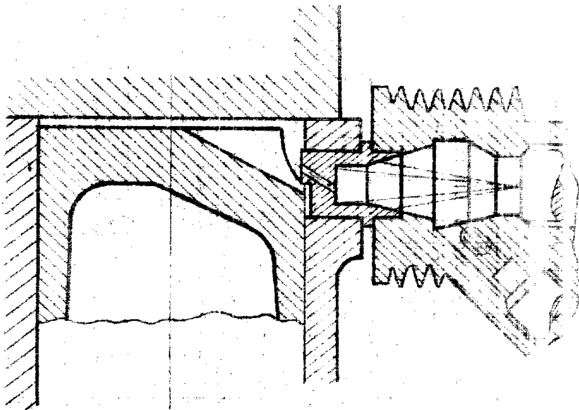


Abb.8 Рис.

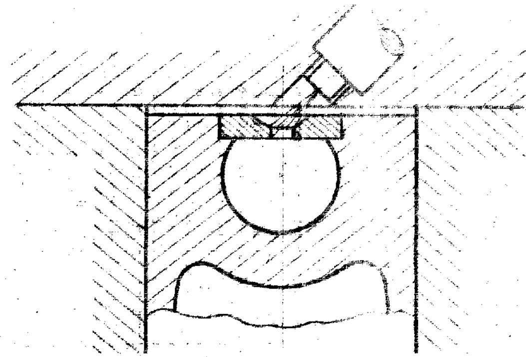


Abb.9 Рис.9

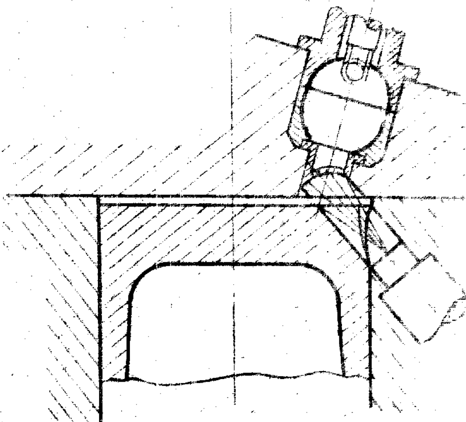


Abb.10 Рис.10

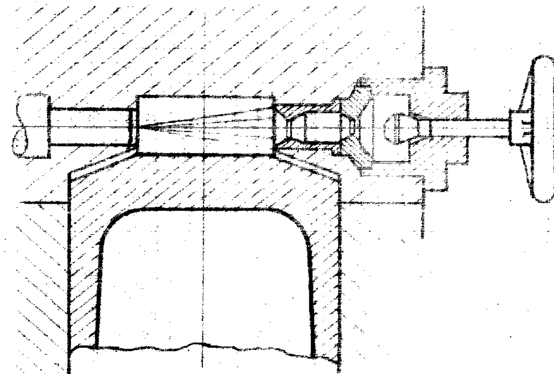
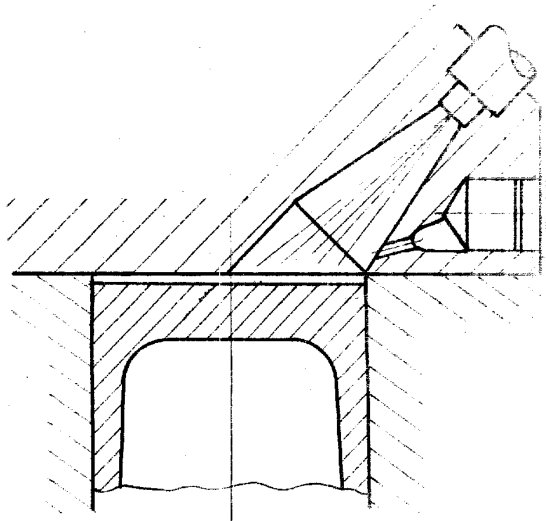
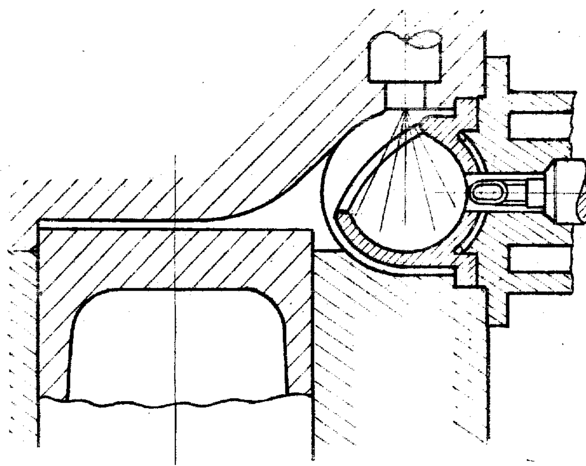


Abb.11 Рис.11



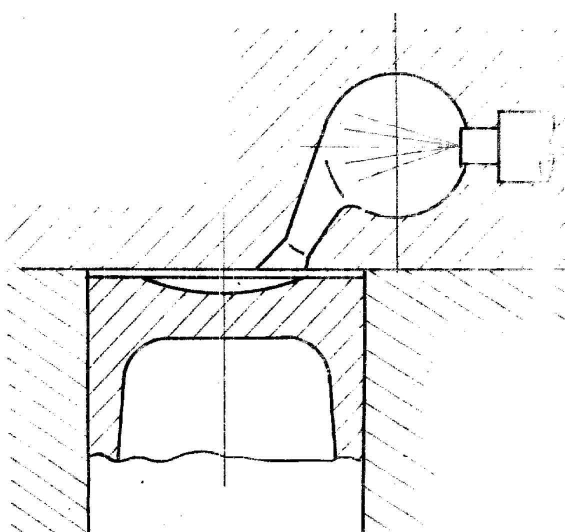
130.12

Abb.12 Рис.12



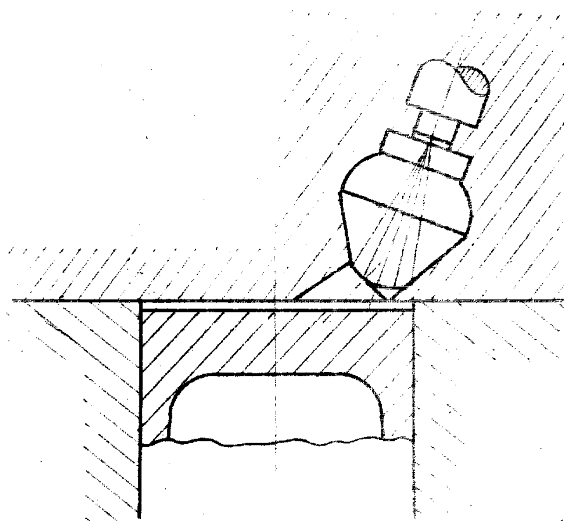
130.13

Abb.13 Рис.13



130.14

Abb.14 Рис.14



130.15

Abb.15 Рис.15

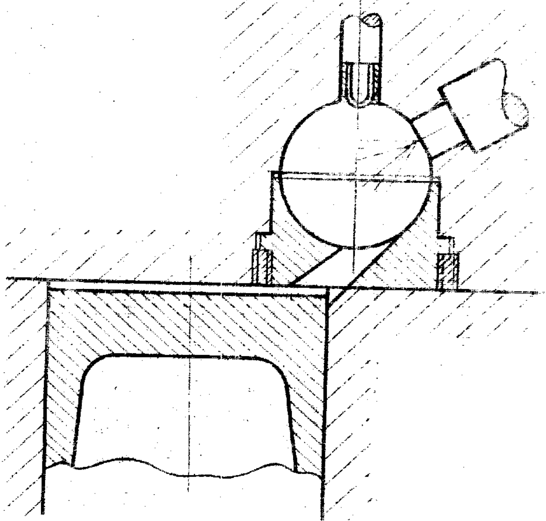


Abb.16 Рис.16

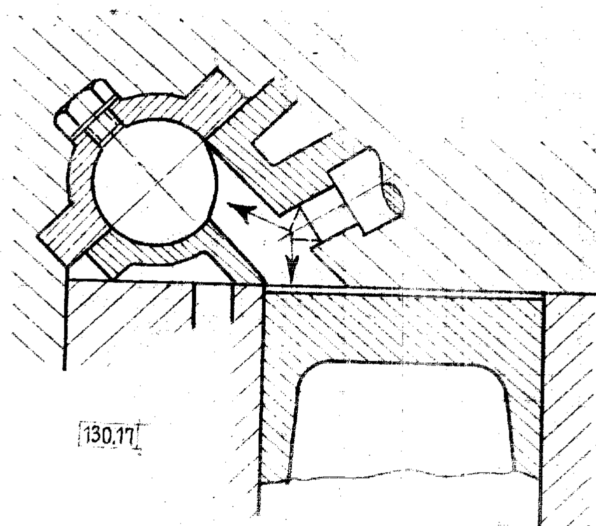
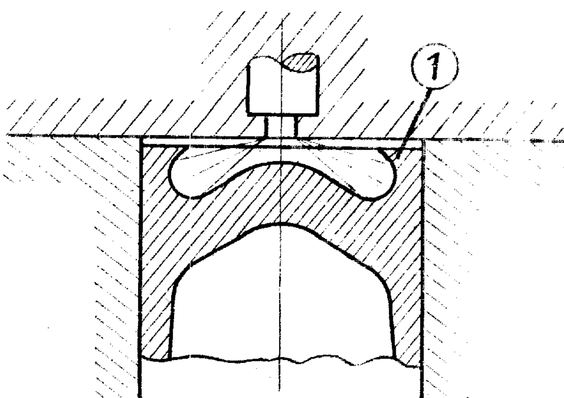


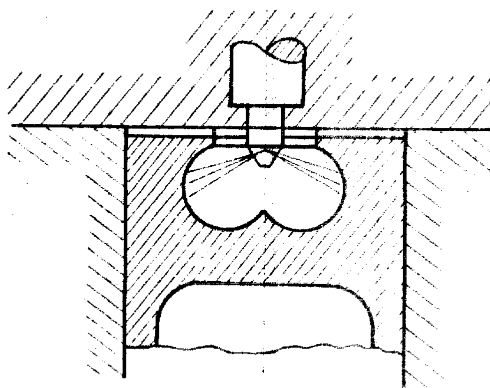
Abb.17 Рис.17

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



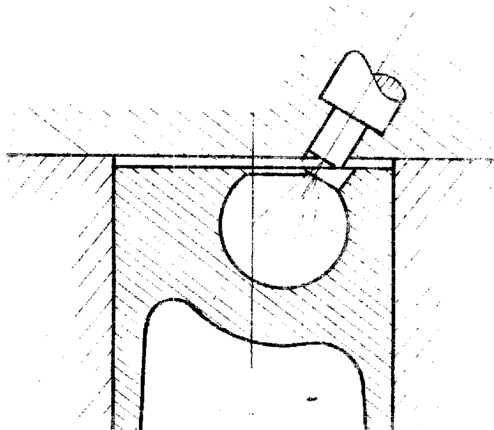
130.18

Abb.18 Рис.18



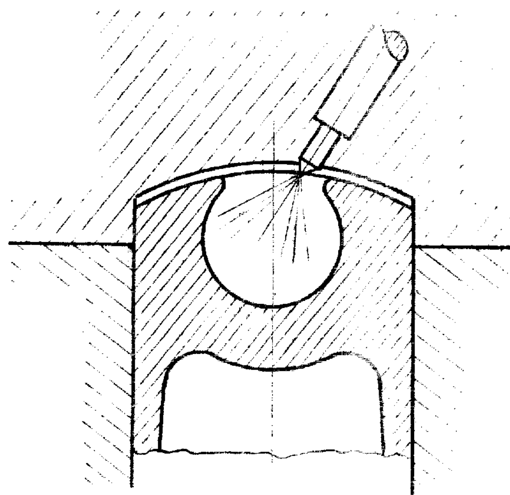
130.19

Abb.19 Рис.19



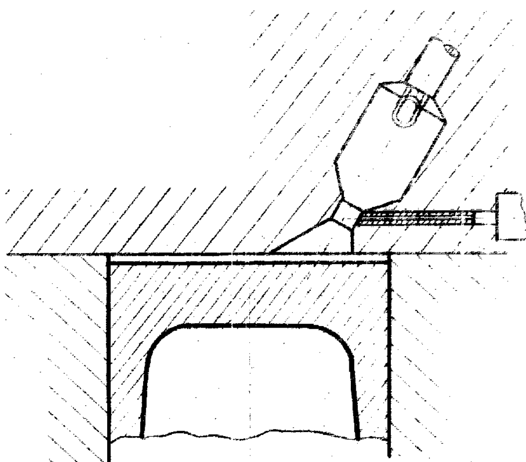
130.20

Abb.20 Рис.20



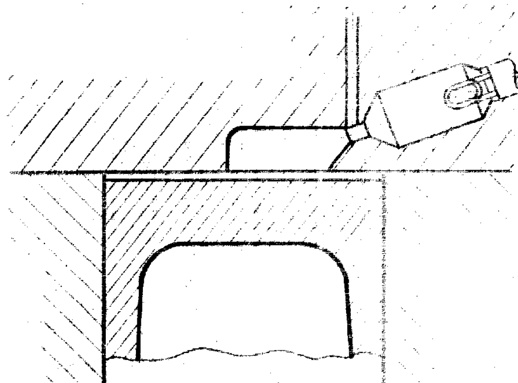
130.21

Abb.21 Рис.21



130.22

Abb.22 Рис.22



130.23

Abb.23 Рис.23

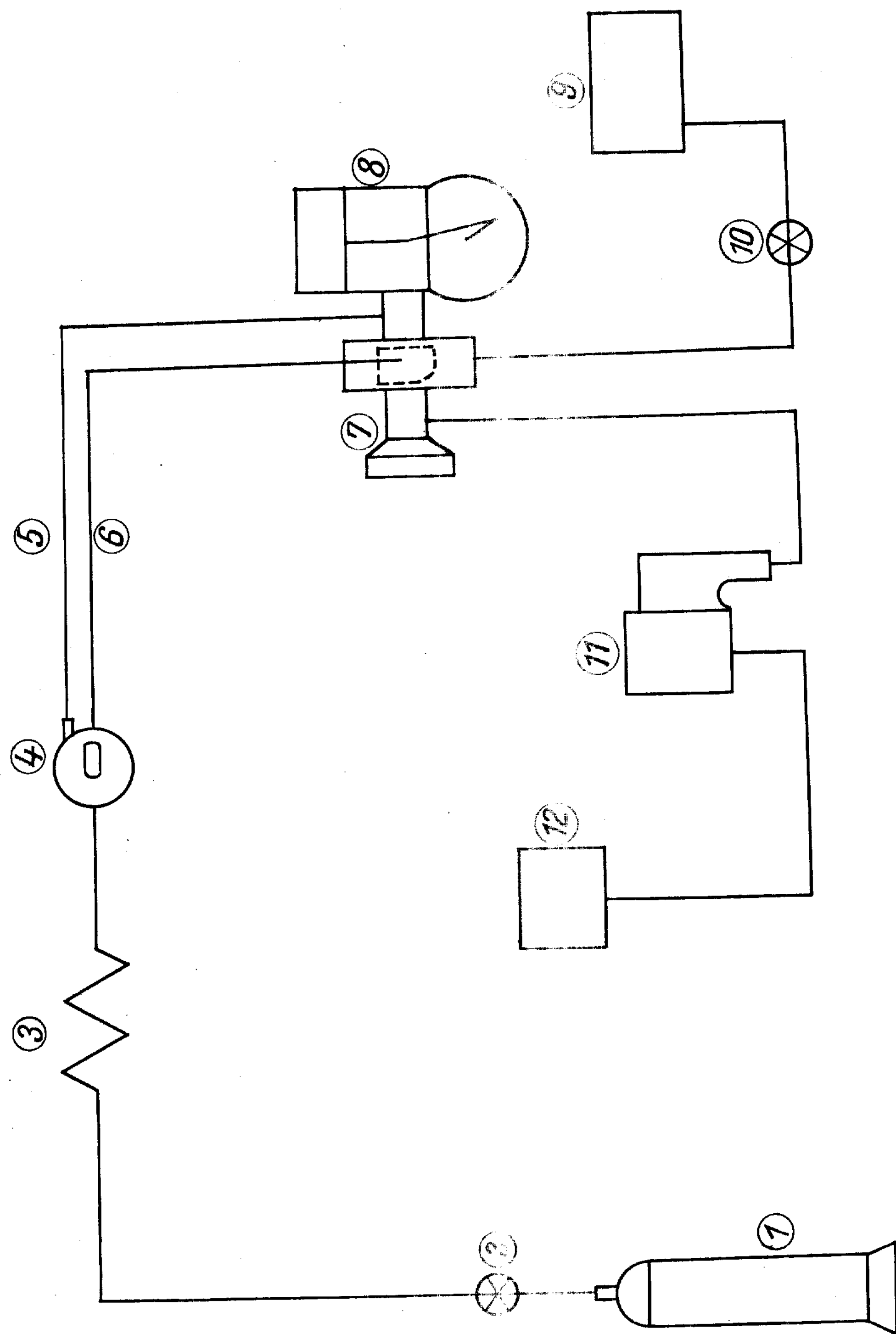


Abb.1 РИС.1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

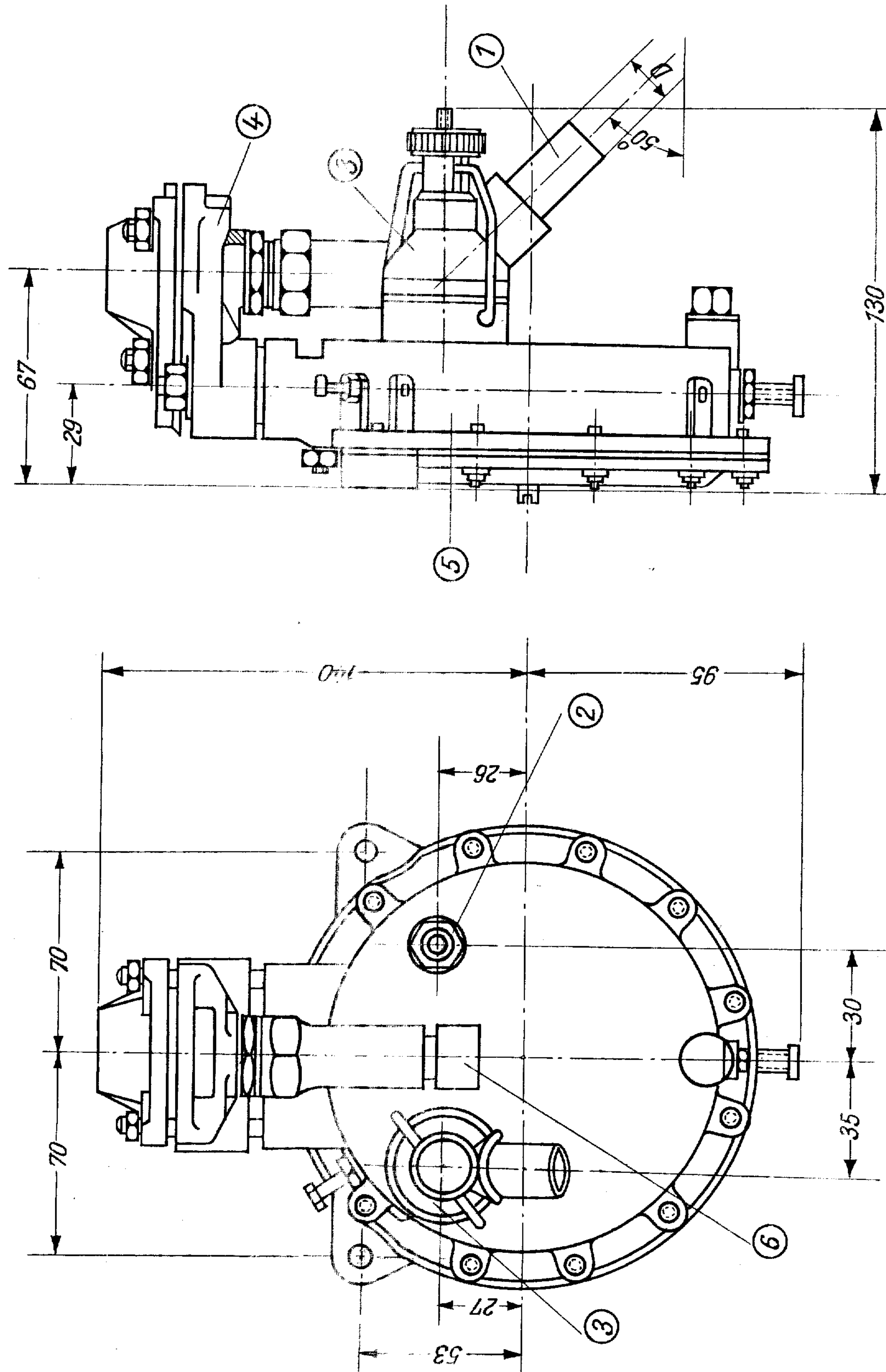


Abb.2 РИС.2

136.2

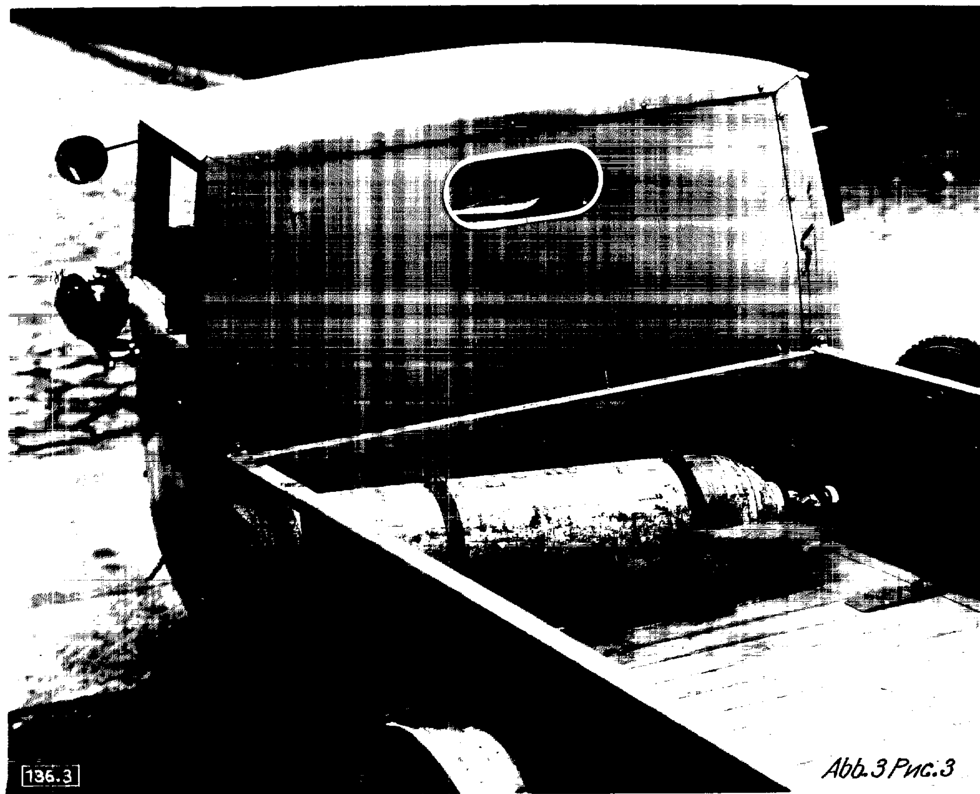


Abb.3 Рис.3

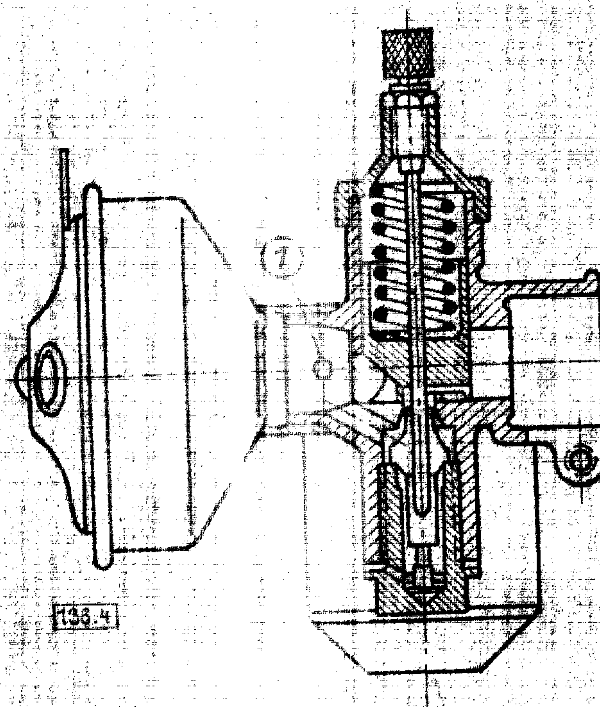


Abb.4 Рис.4

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

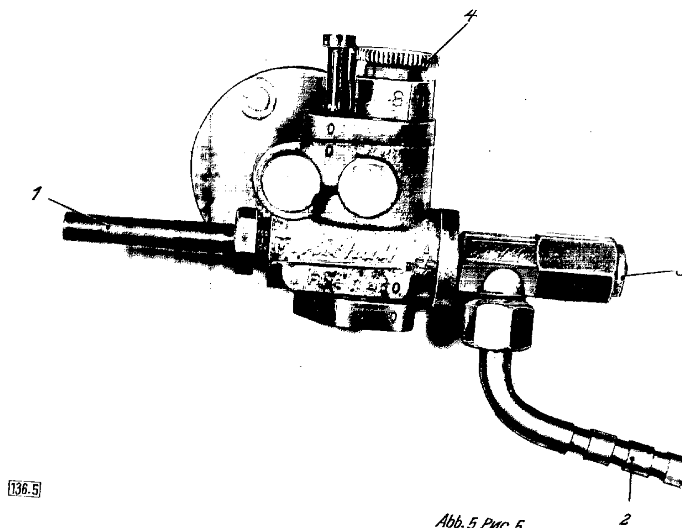


Abb. 5 Рис. 5

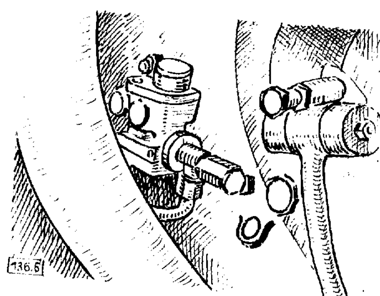
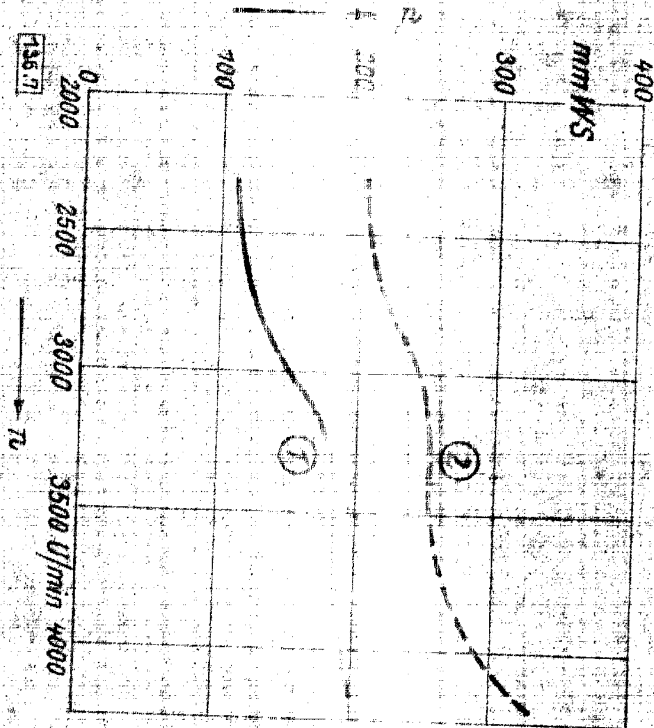


Abb. 6 Рис. 6

136.7



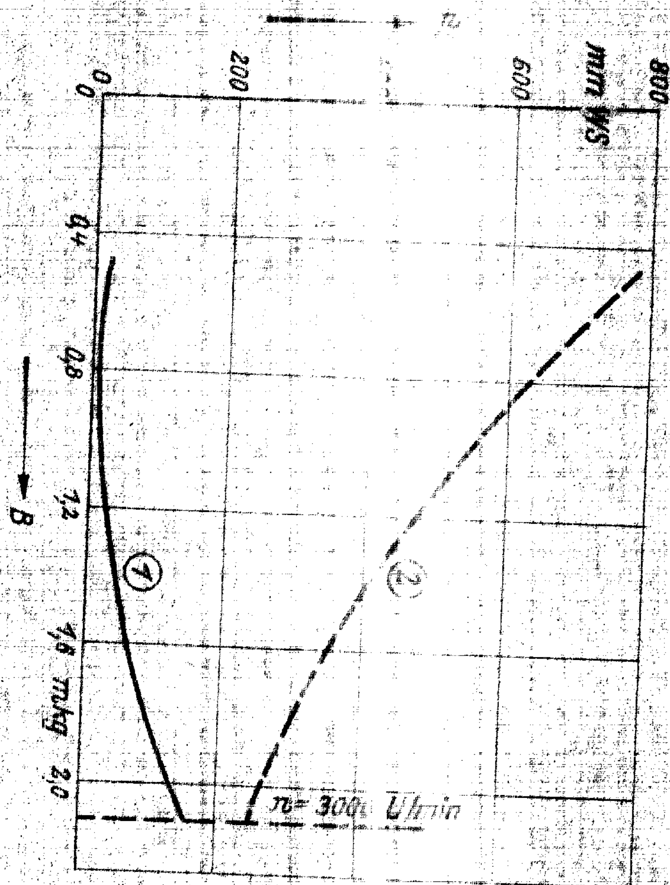
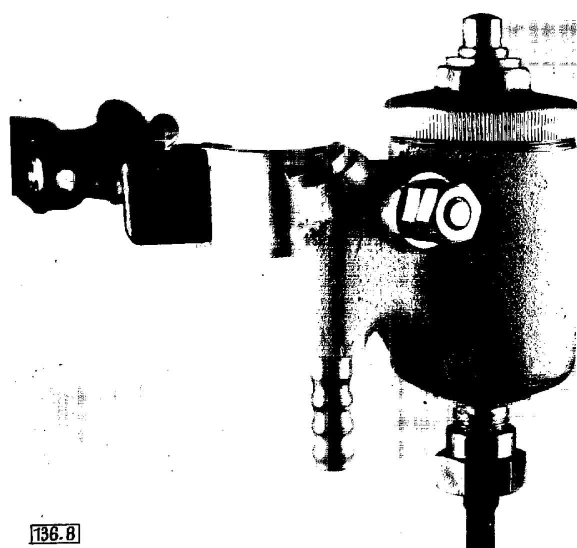


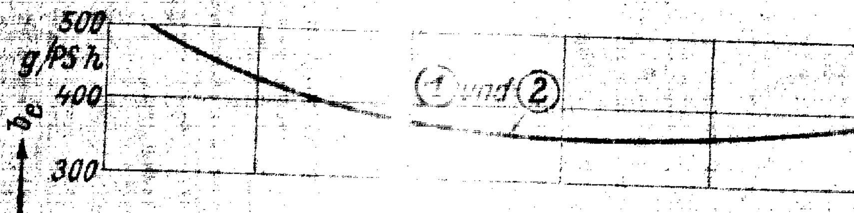
Abb.7 Рис.7

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



136.8

Abb.8 Рис.8



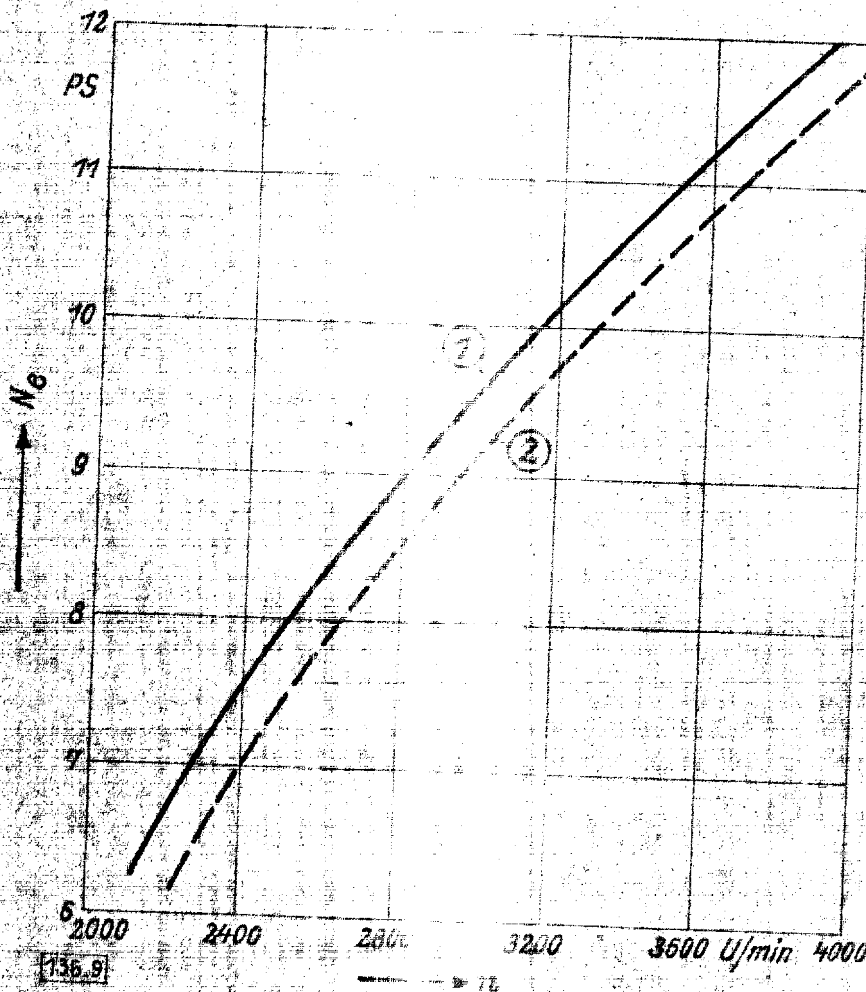


Abb.9 Рис.9

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

300 %

0%

10%

200

20%

30%

η →

40%

50%

100

0

4 8 12 16 20 24 28 32 °C 36

t

[136.11]

Abb. 11 Рис. 11

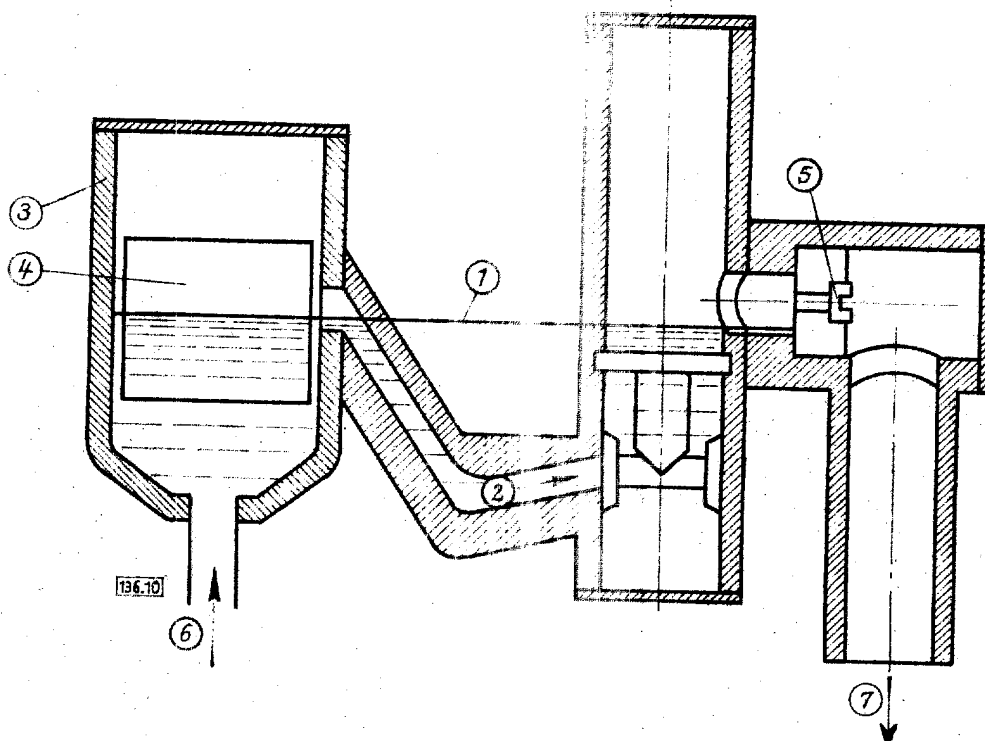


Abb. 10 Рис. 10

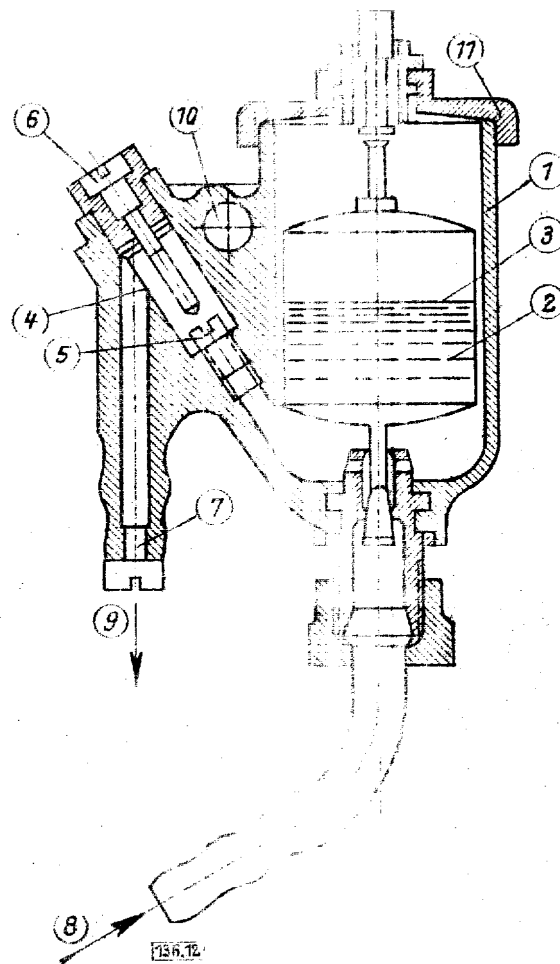
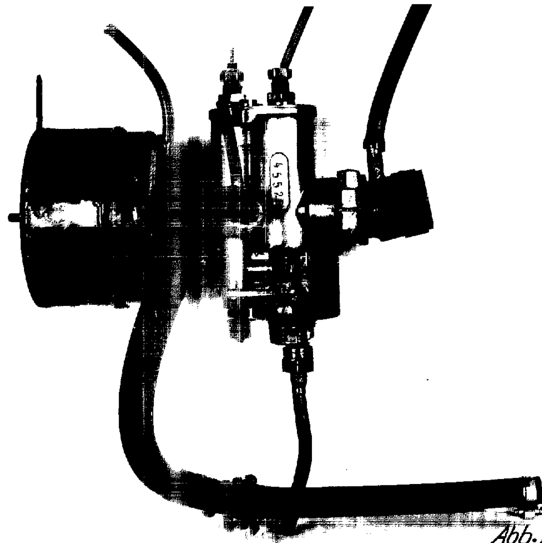


Рис. 12

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



136.13

Abb. 13 Рис. 13

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

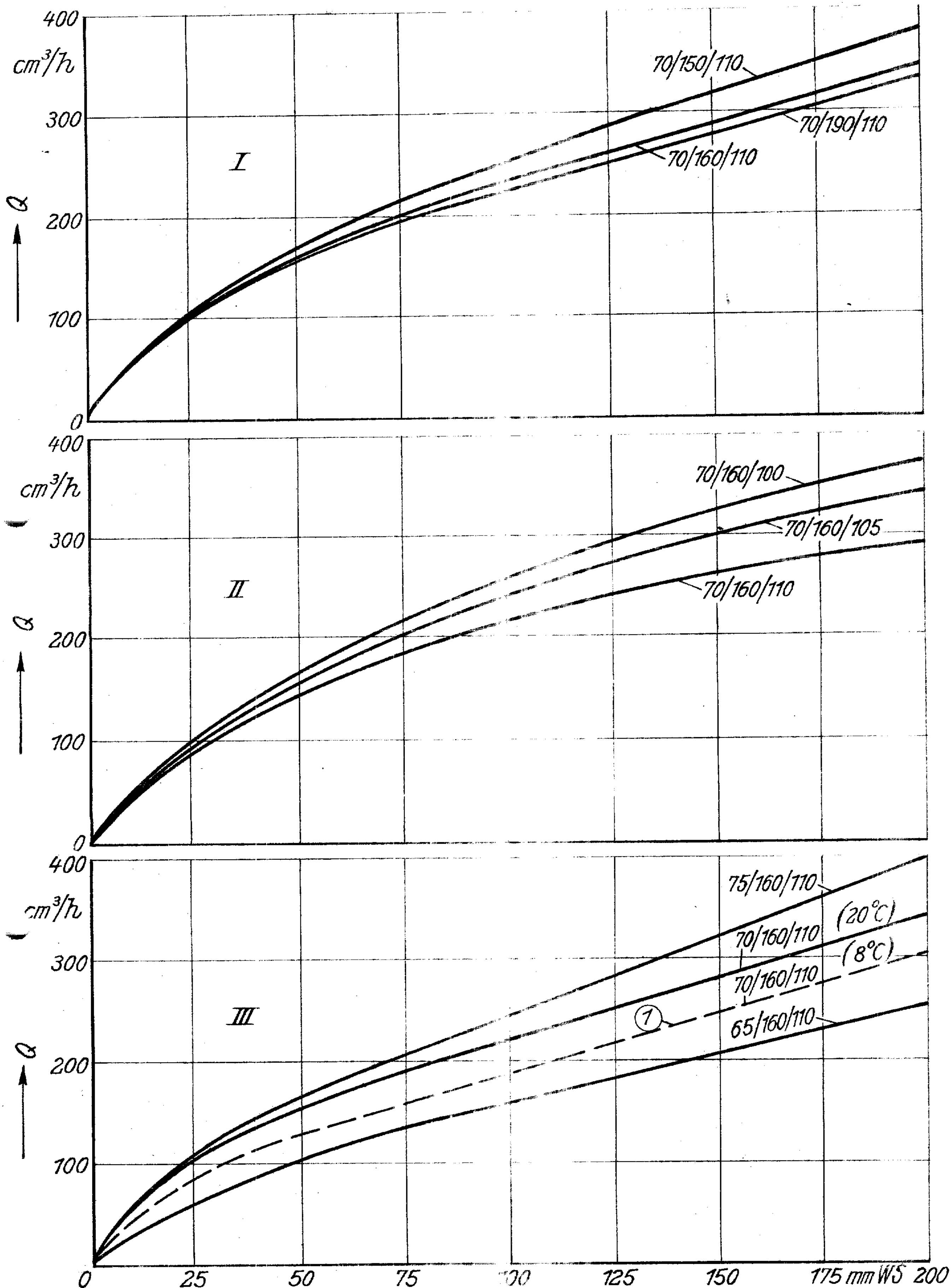

400
cm³/h
300
200
100
0
Q
I
70/150/110
70/190/110
70/160/110
II
70/160/100
70/160/105
70/160/110
III
75/160/110
(20°C)
70/160/110
(8°C)
70/160/110
1
65/160/110
0
25
50
75
100
125
150
175 mm WS 200
136.14

 Abb. 14 Рис. 1

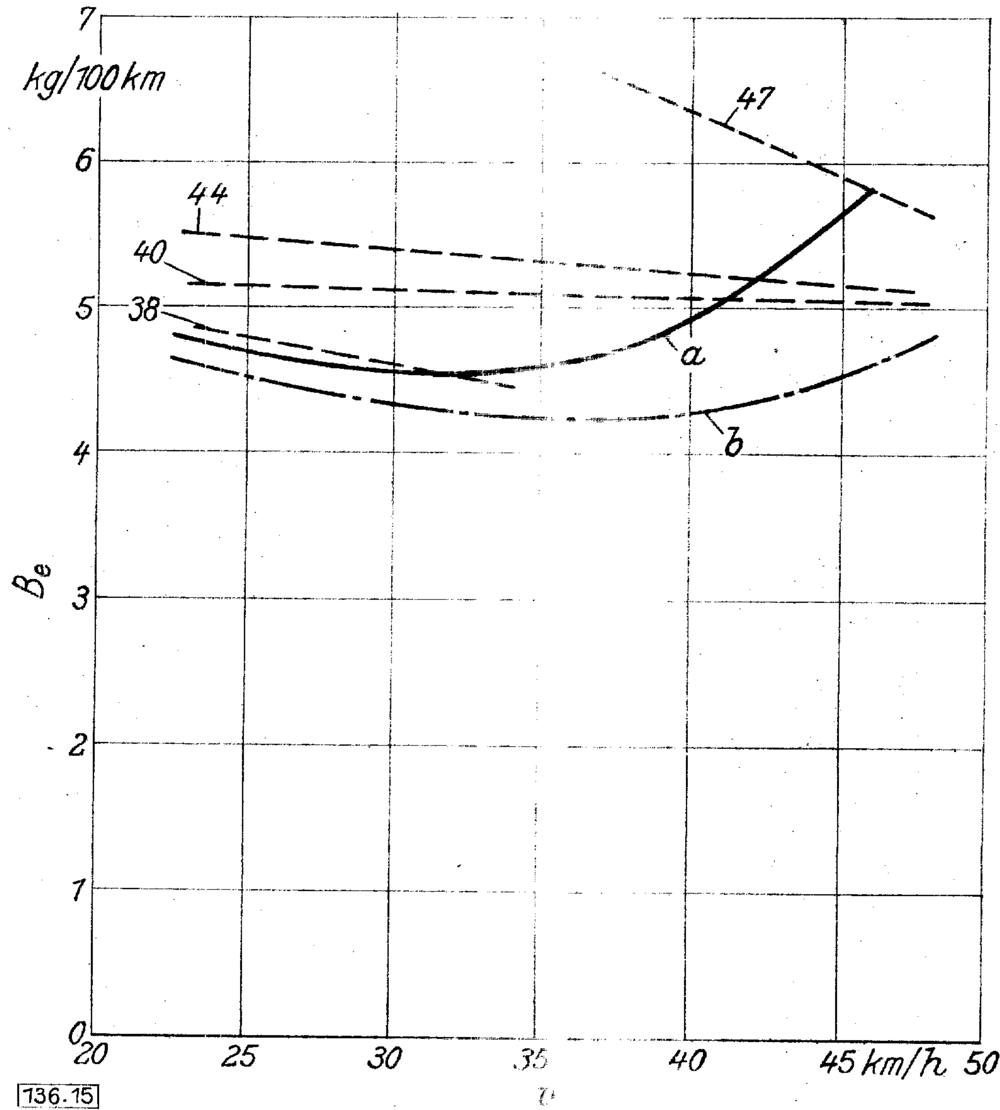
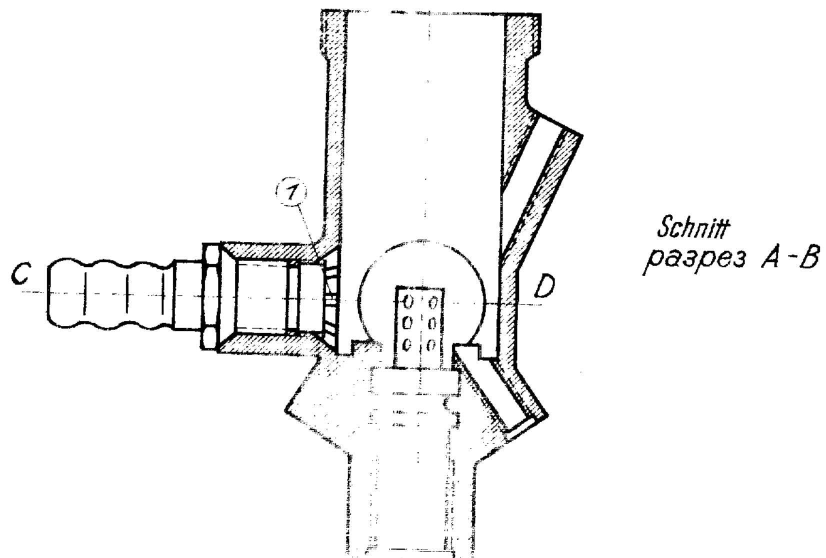


Abb. 15 Рис. 15

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



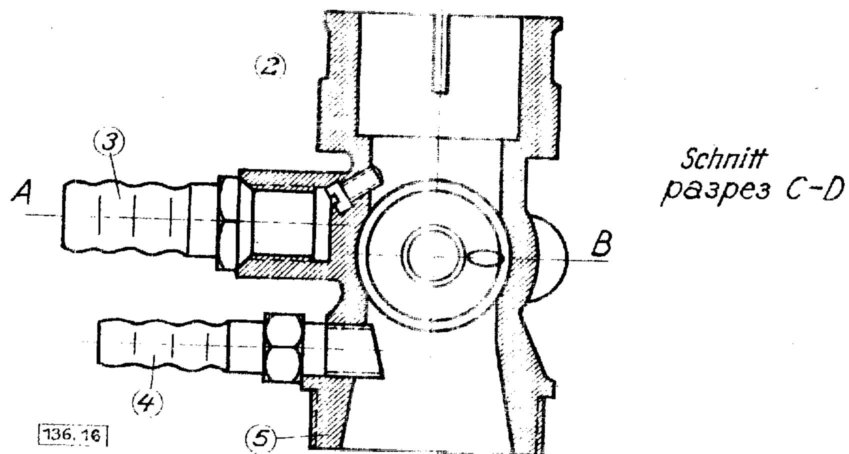
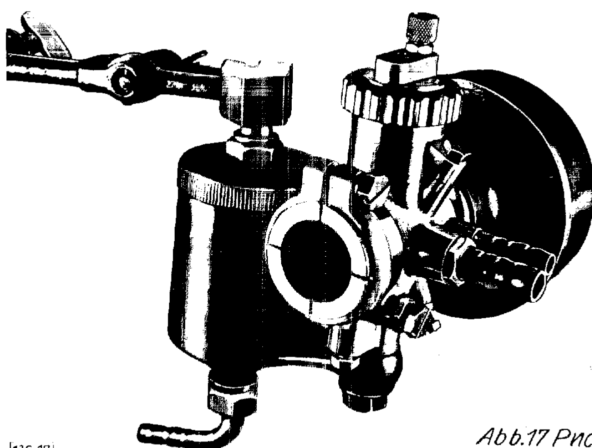


Abb. 16 Рис. 16



[136-17]

Abb.17 Рис17

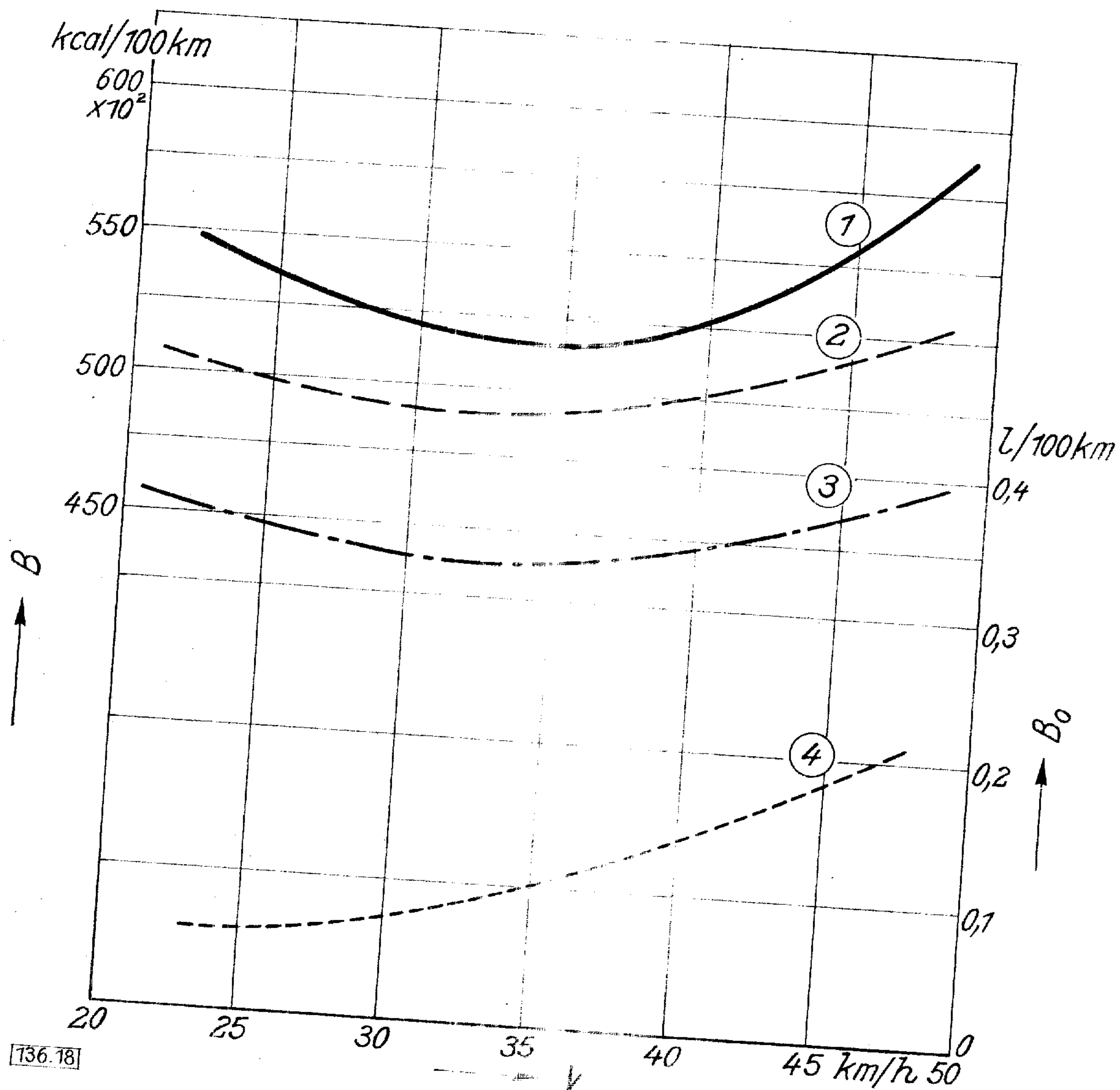


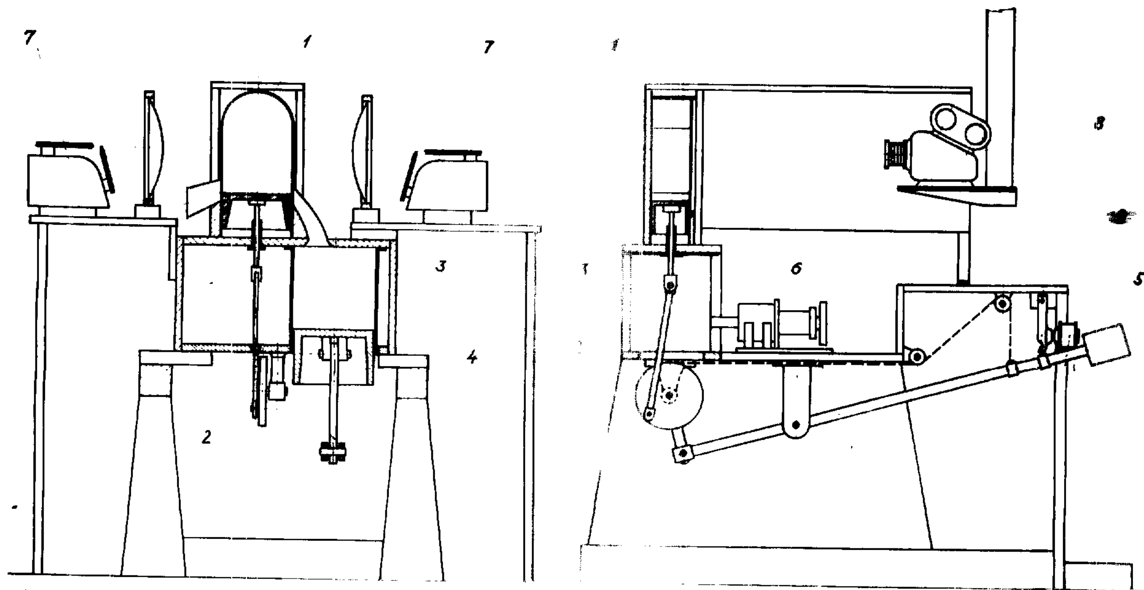
Abb. 18 Рис. 18

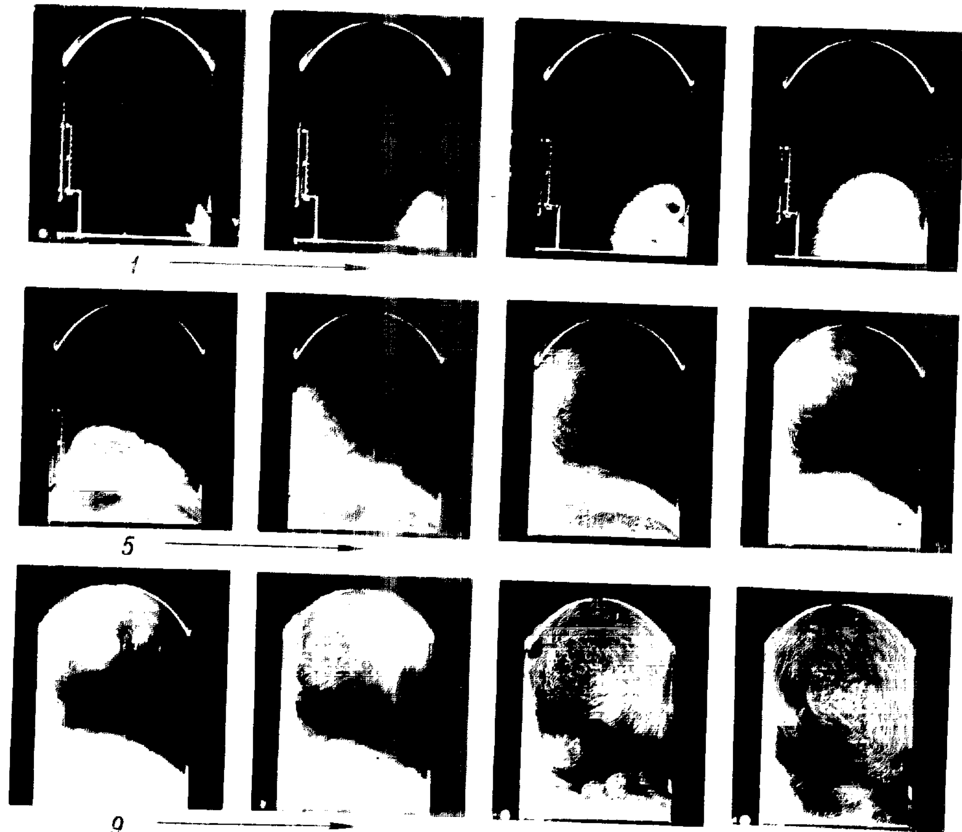
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

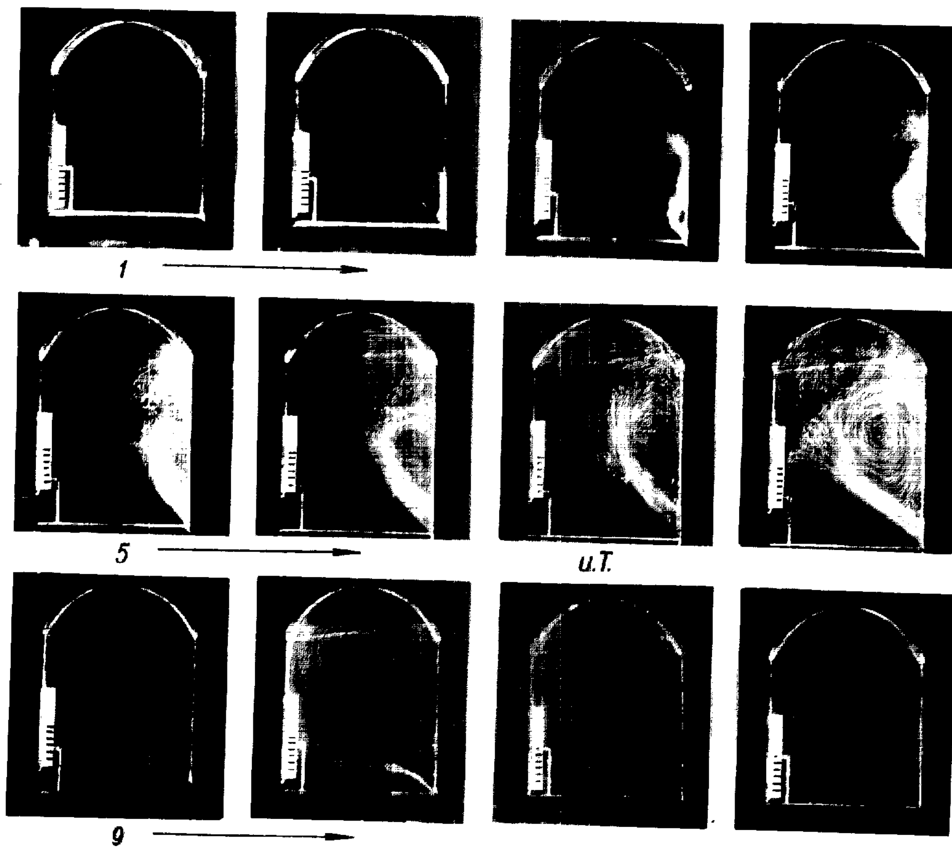
	каналы Schlitze:	после 4000 км. езды Nach 4000 km:	очищены Gereinigt:
правый цилиндр Rechter Zylinder	впуск Einlaß		
	перепуск Überström		
	выпуск Auslaß		
левый цилиндр Linker Zylinder	впуск Einlaß		
	перепуск Überström		
	выпуск Auslaß		

136.19

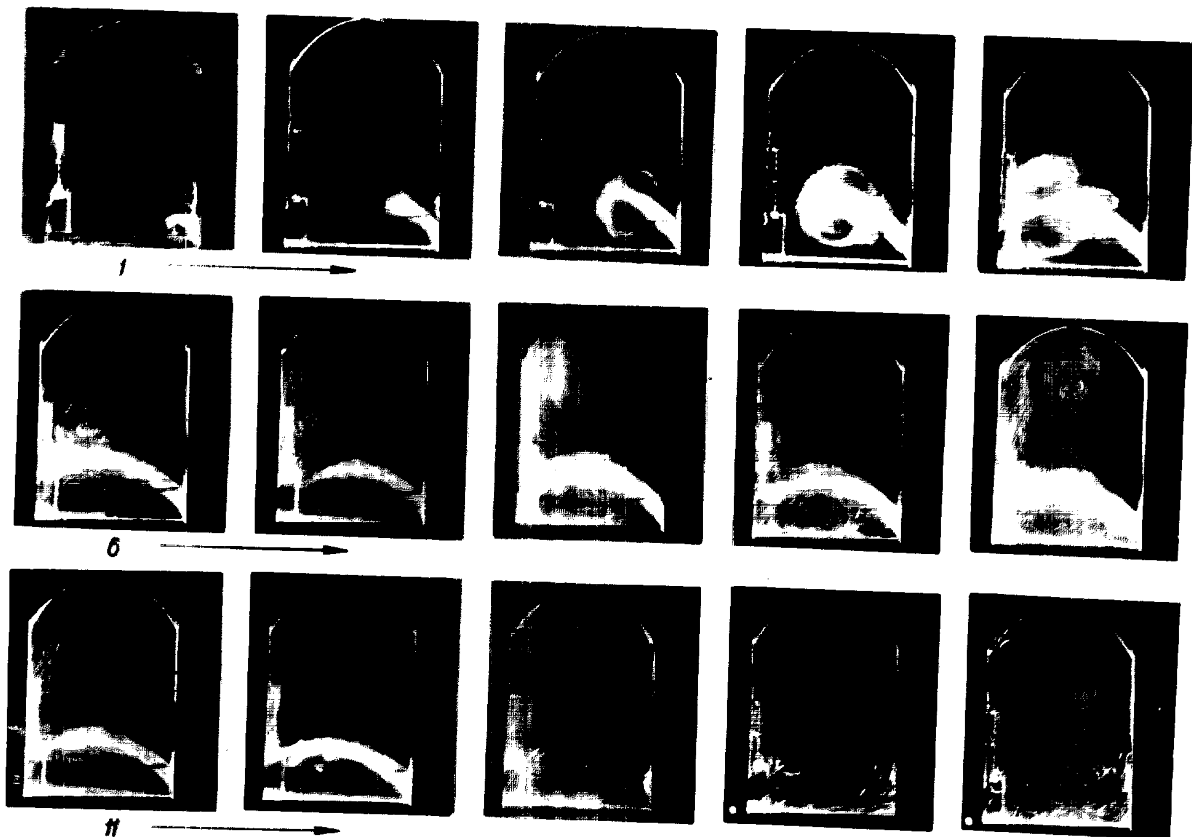
Abb.19 Рис.19

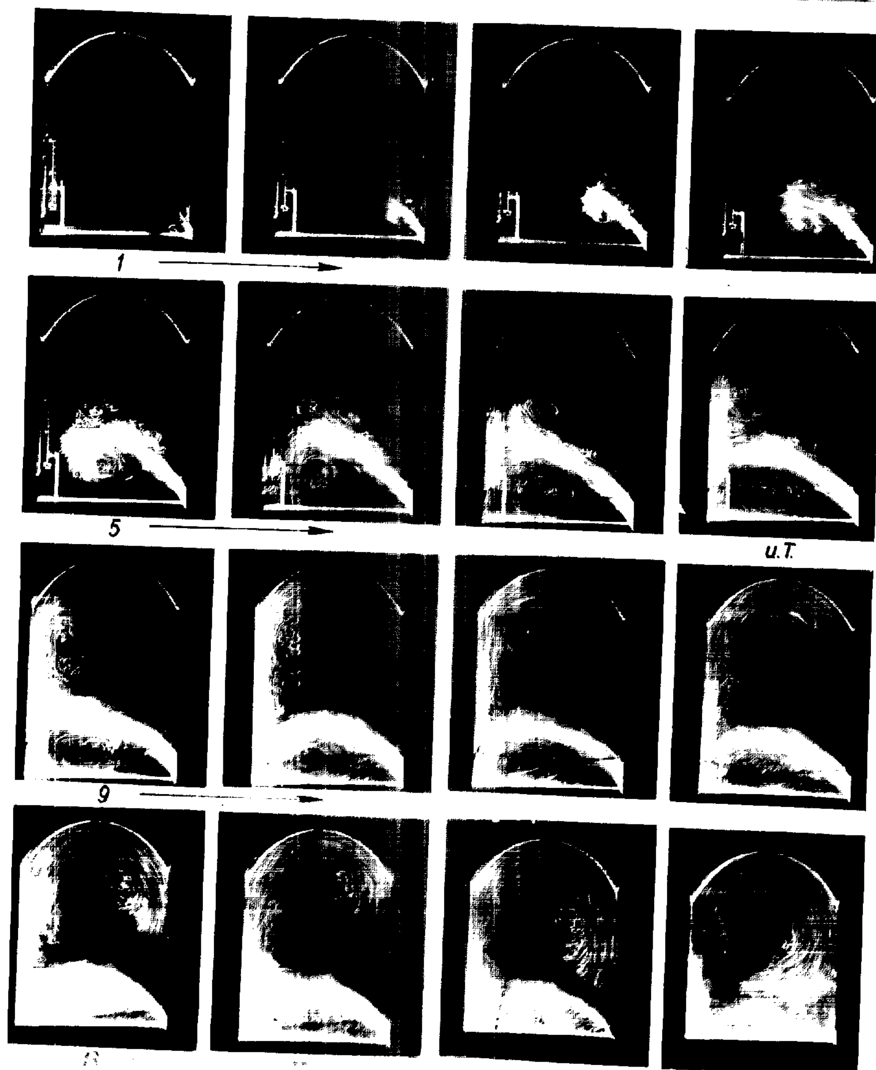

7
1
7
3
4
2
1
8
6
5

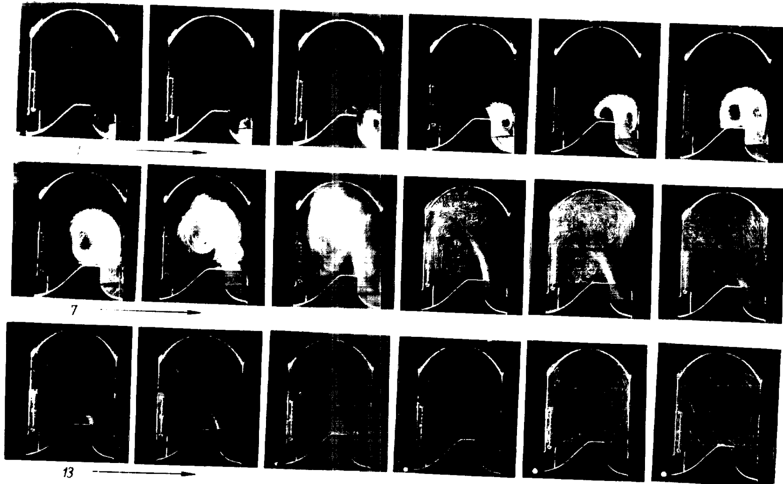

1
5
9

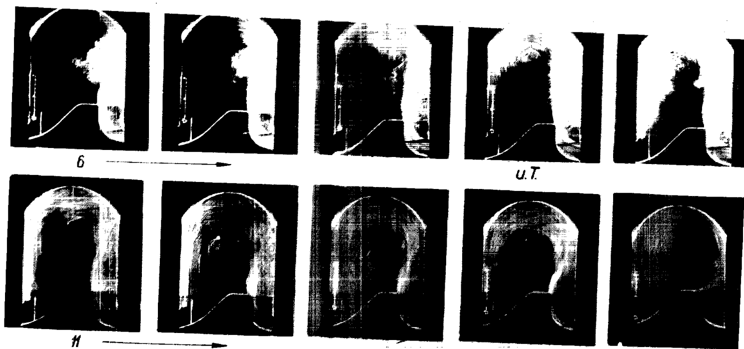


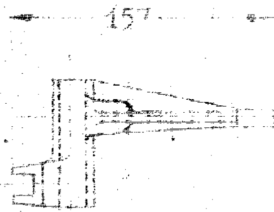
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2


1
6
11

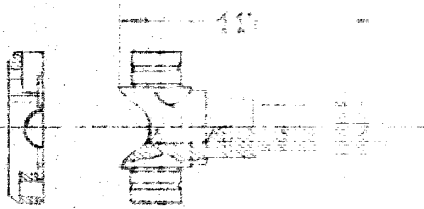

1
5
u.T.
9

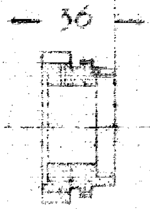

7
13

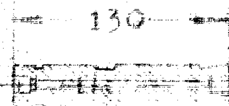

6
u.T.
11

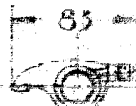






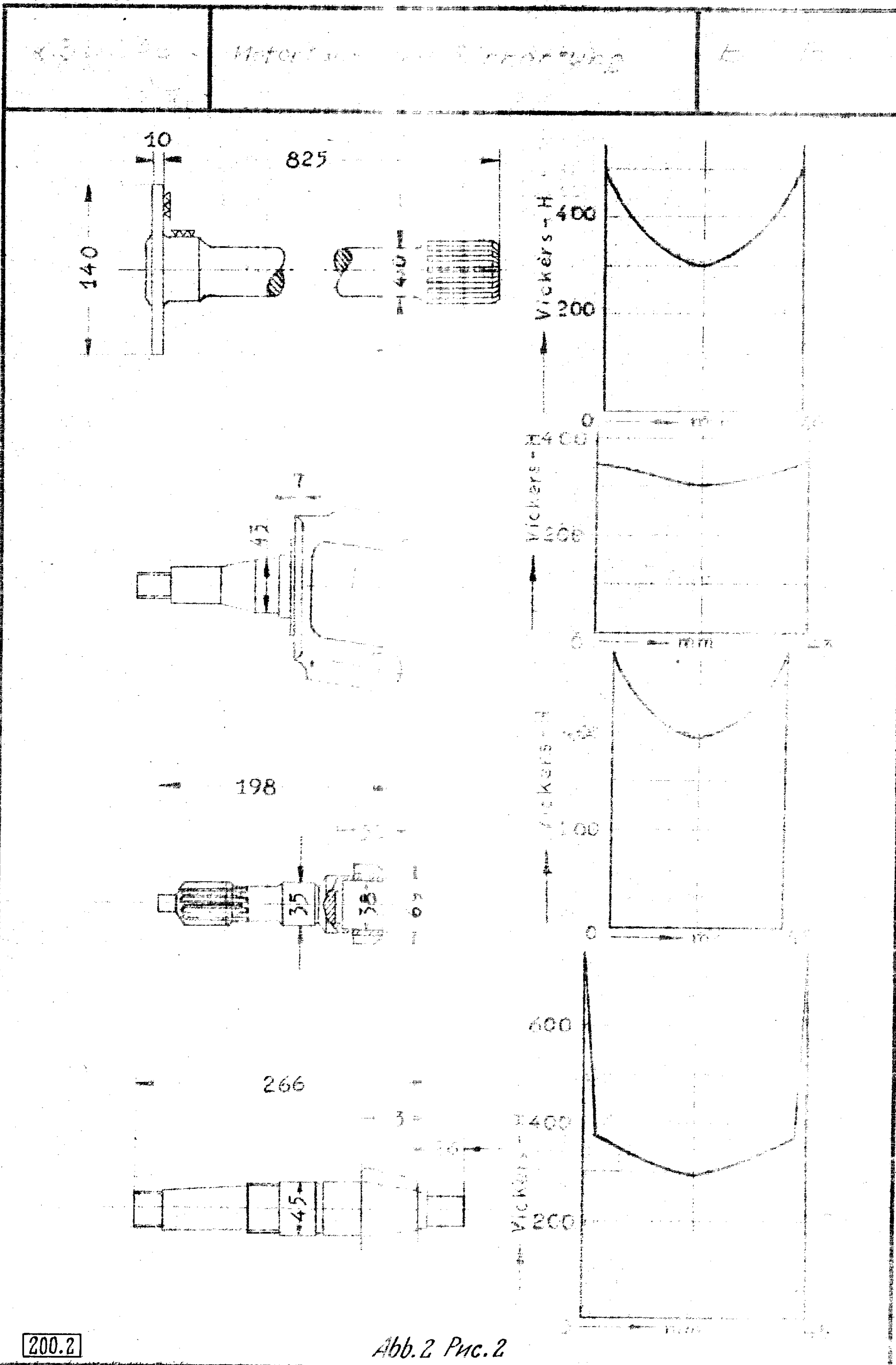






200.1

Abb.1 Рис.1



200.2

Abb.2 Рис.2

Normblattvordruck klar A 4

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

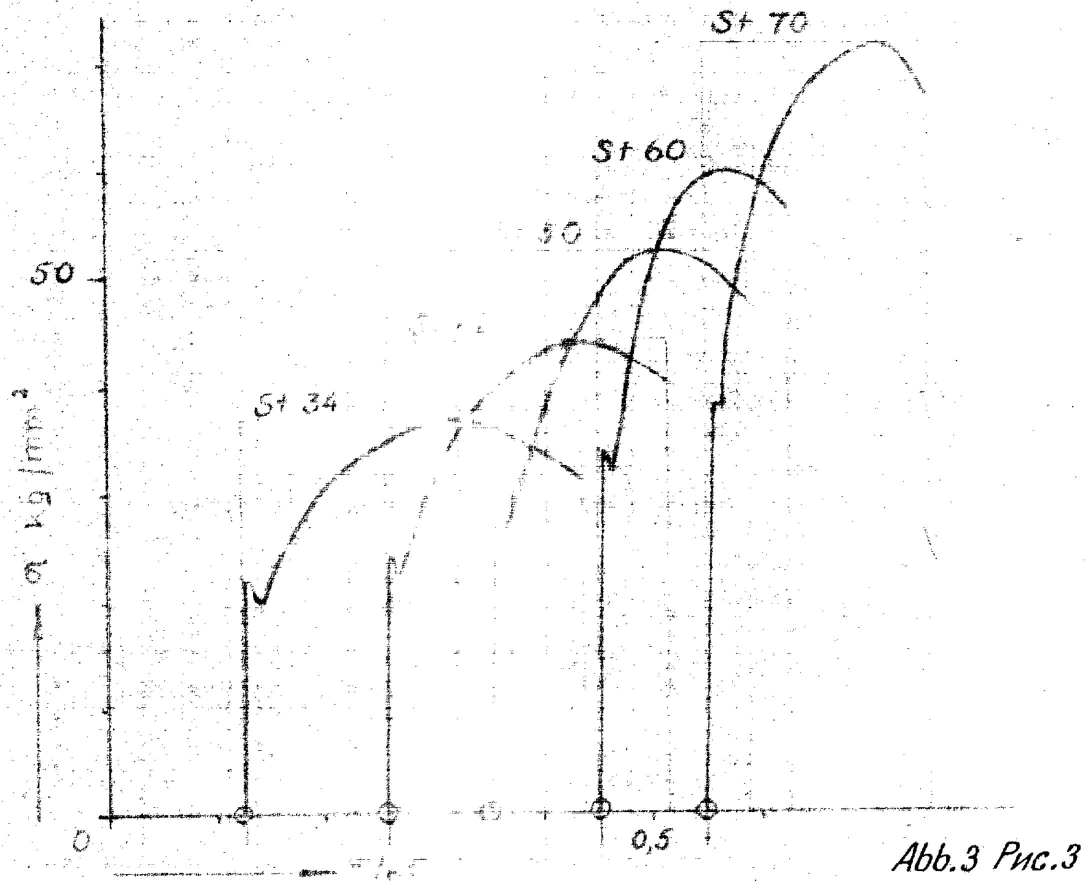
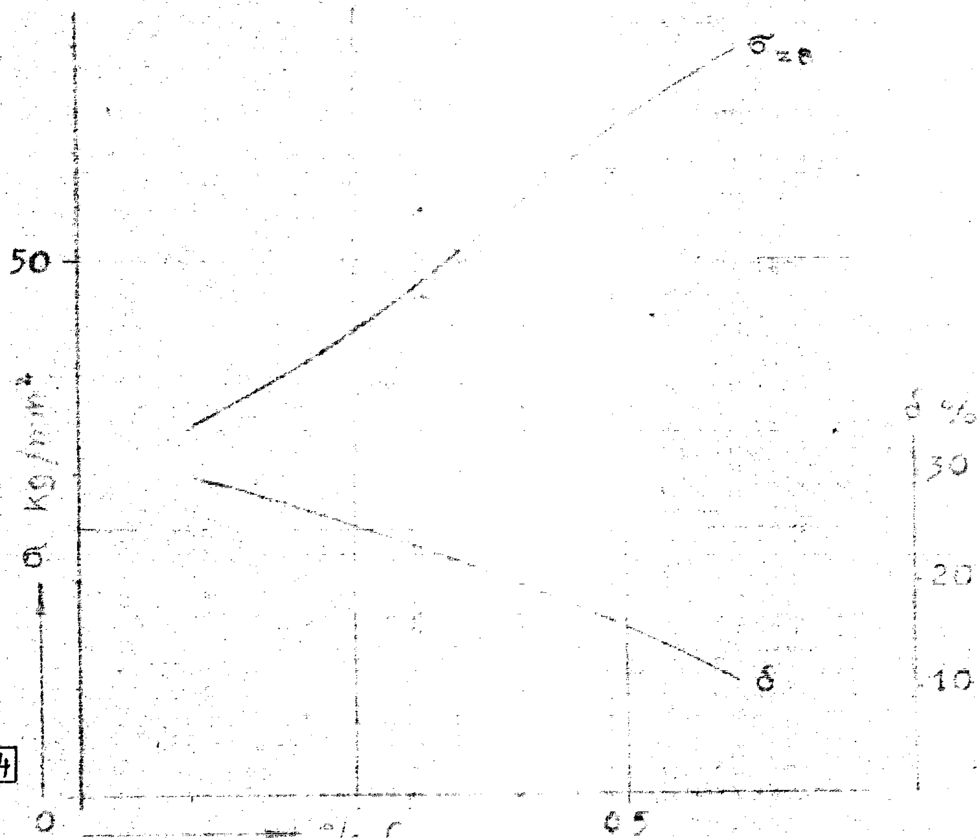


Abb.3 Рис.3

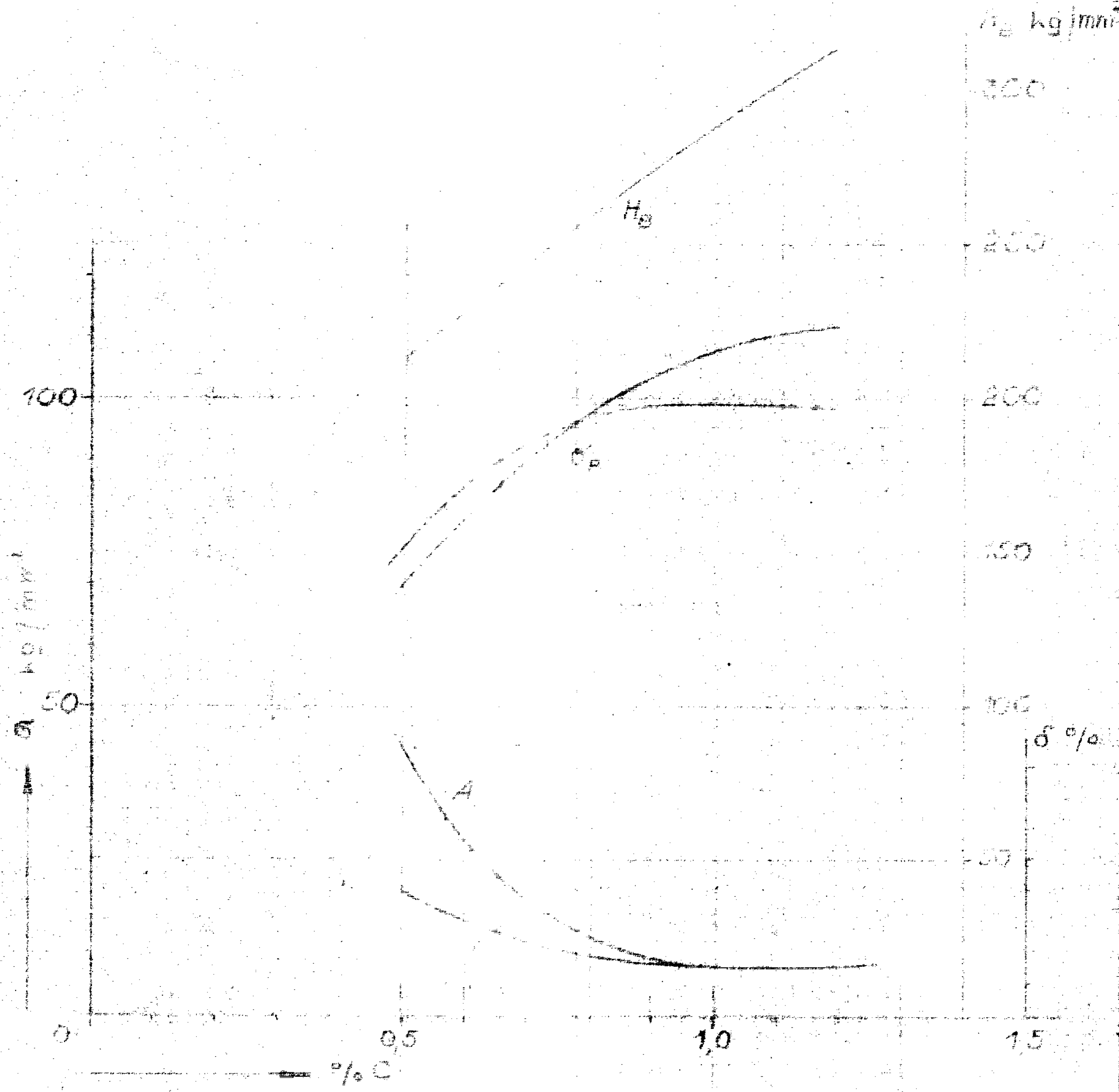
200.3



200.4

Abb.4 Рис.4

5

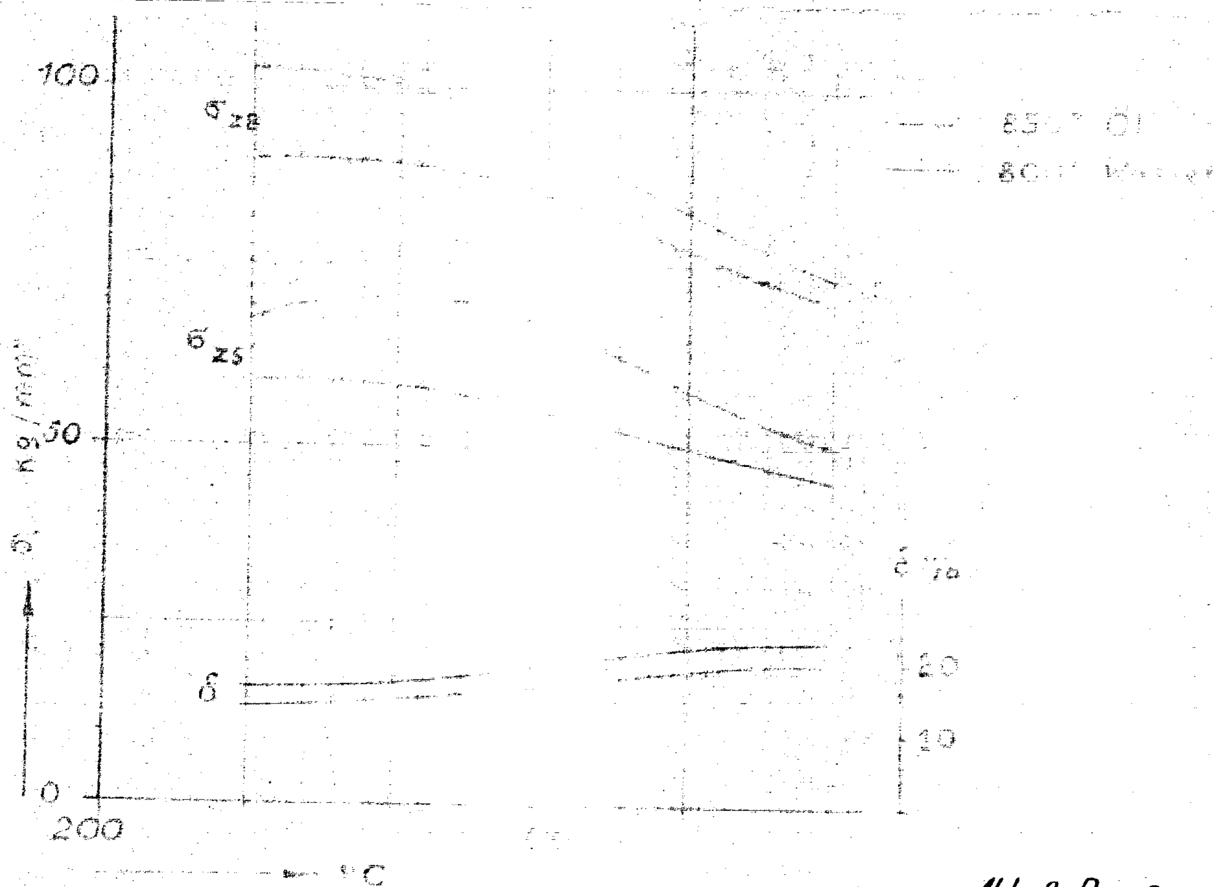


200.5

Abb. 5 Рис. 5

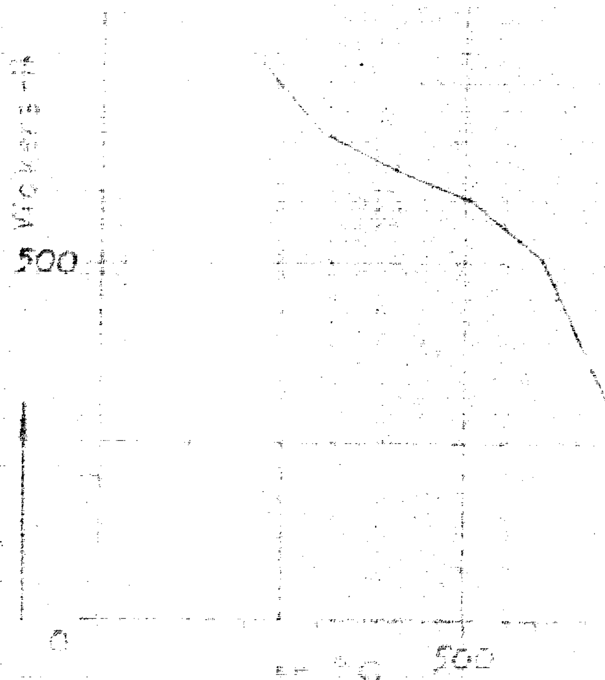
Normblattvordruck klar A 4

Fabrikform, Berlin-Friedenau — C 1419



200.6

Abb. 6 Рис. 6



200.7

Abb. 7 Рис. 7



Abb.8 Рис.8

legiert

300

450

600

700

% C

σ_{zB}

σ_{zS}

δ

ψ

300 450 500 600

°C

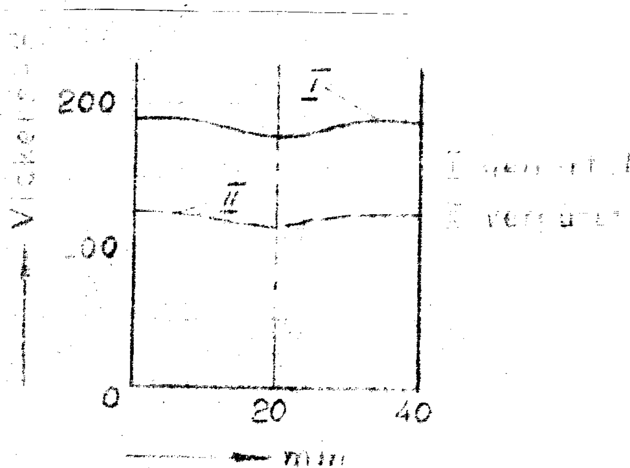
150

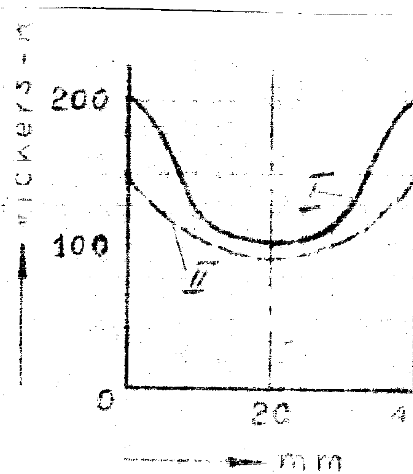
50

kg / mm² or

Normblattvordruck klar A 4

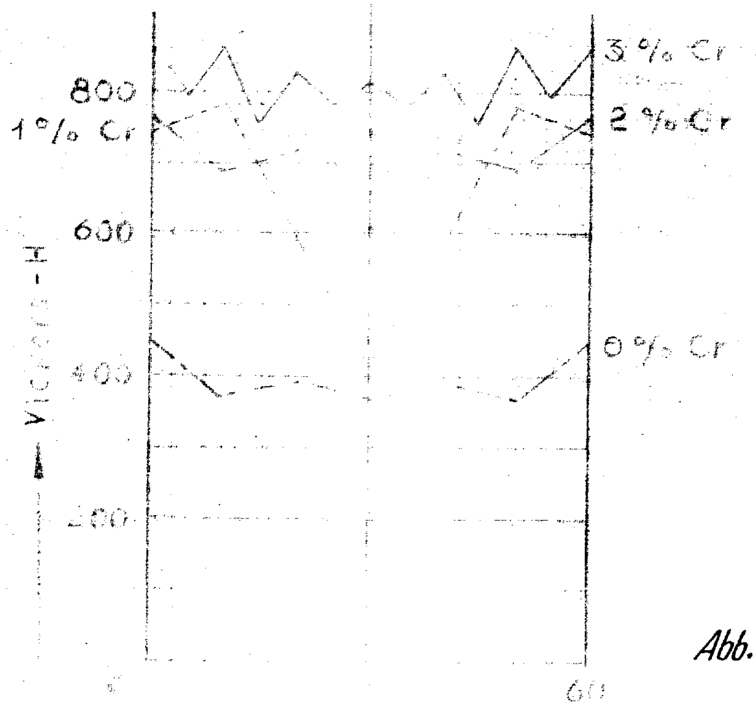
Fabriknorm, Berlin-Friedenau — C 1419





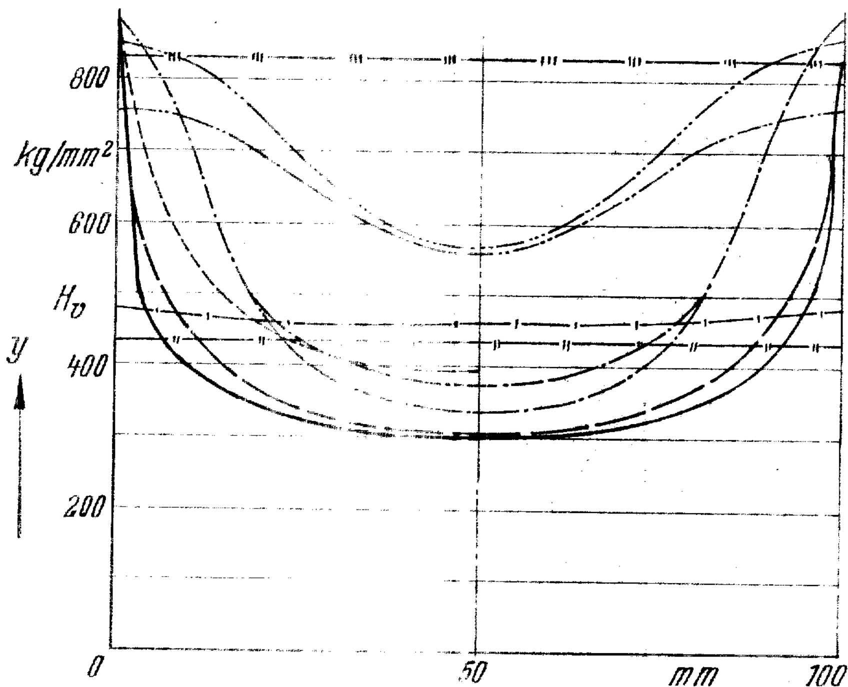
200.9

Abb.9 Рис.9



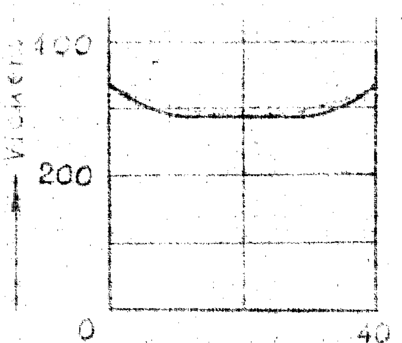
200.10

Abb. 10 Рис. 10



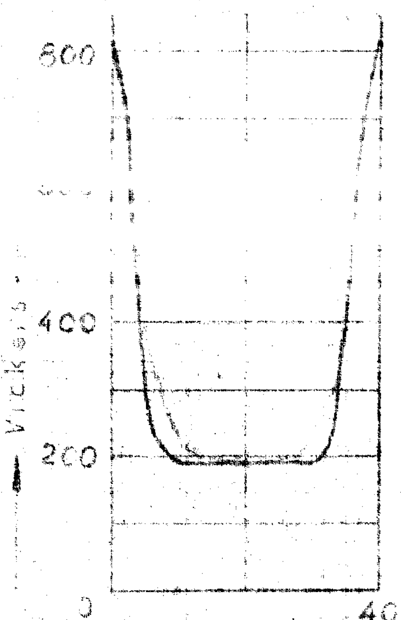
200.11

Abb. 11 Рис. 11



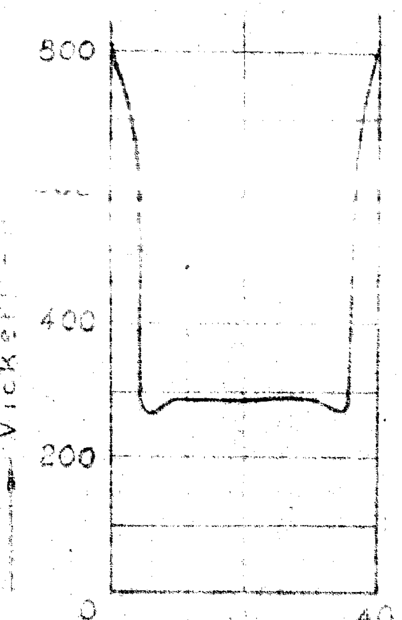
200.12

Abb.12 Рис.12



200.13

Abb.13 Рис.13



200.14

Abb.14 Рис.14

102.46	Einhärtung von Stahl beim Abschrecken von 850°C in H_2O (I) Oel A (II), B (III), D (IV).	27 B

15

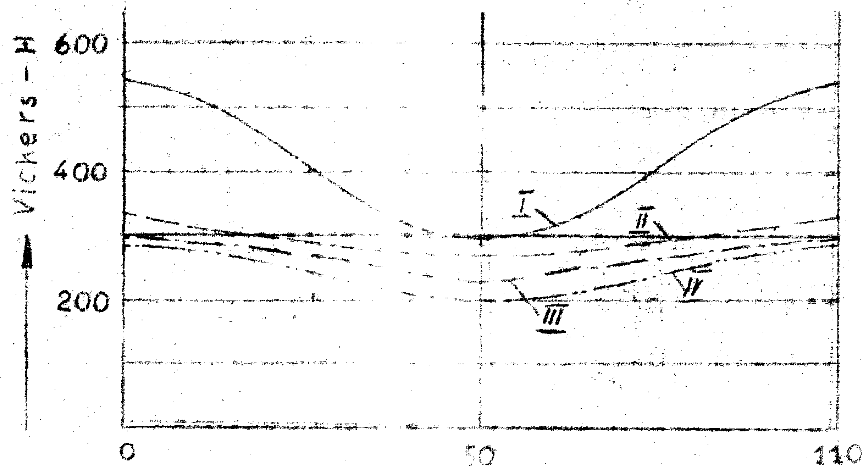


Abb. 15 Рис. 15

16

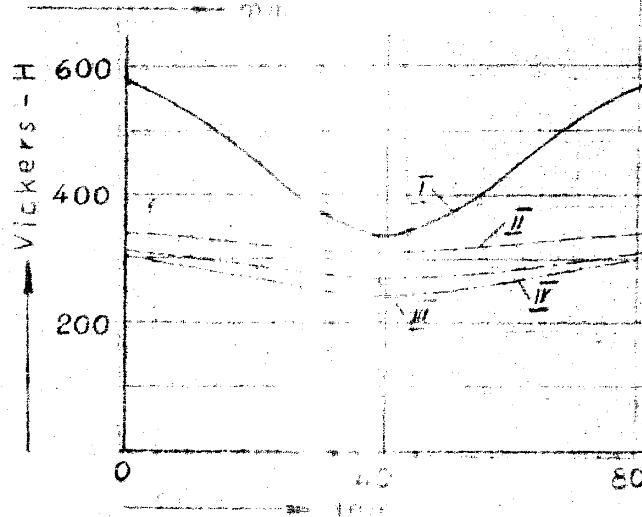


Abb. 16 Рис. 16

17

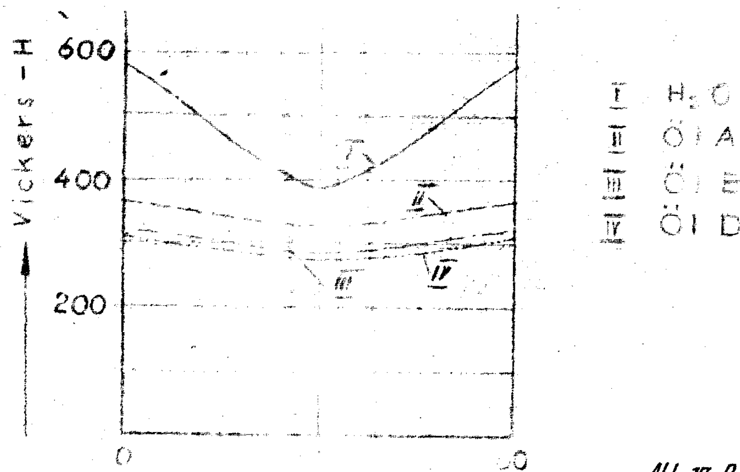
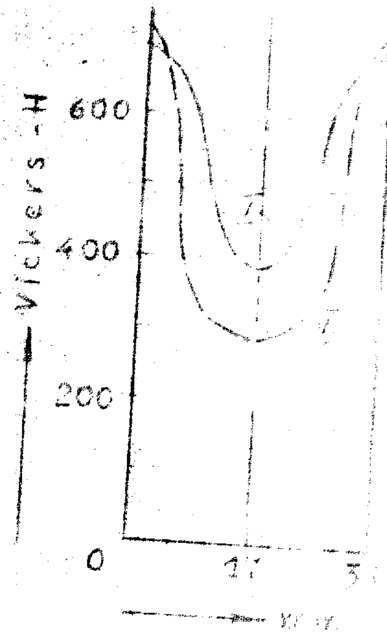
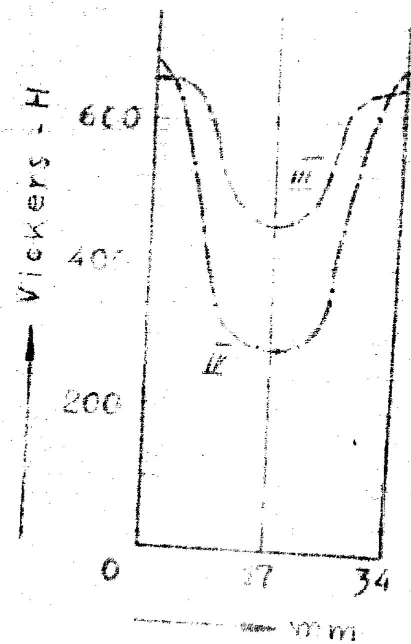


Abb. 17 Рис. 17

Bestellwort **Normblattvordruck**

Fabriknorm: Berlin-Friedenau



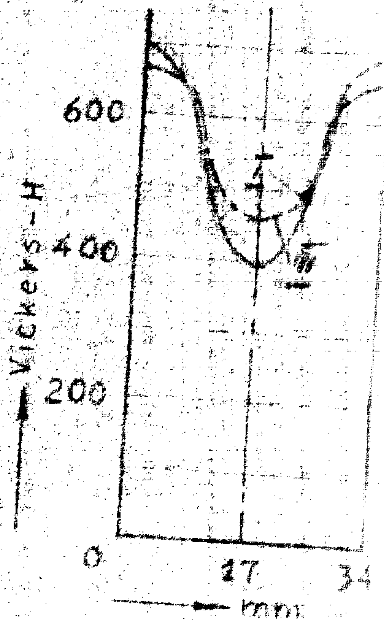


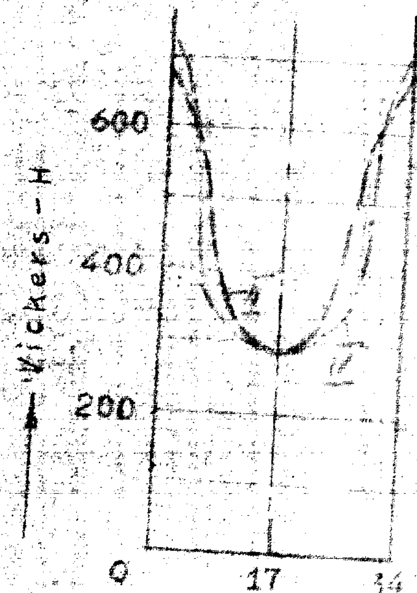
I, II } Z[illegible] an der oberen [illegible]-Grenze

III, IV } " " " " unteren " "

200.18

Abb. 18 Рис. 18



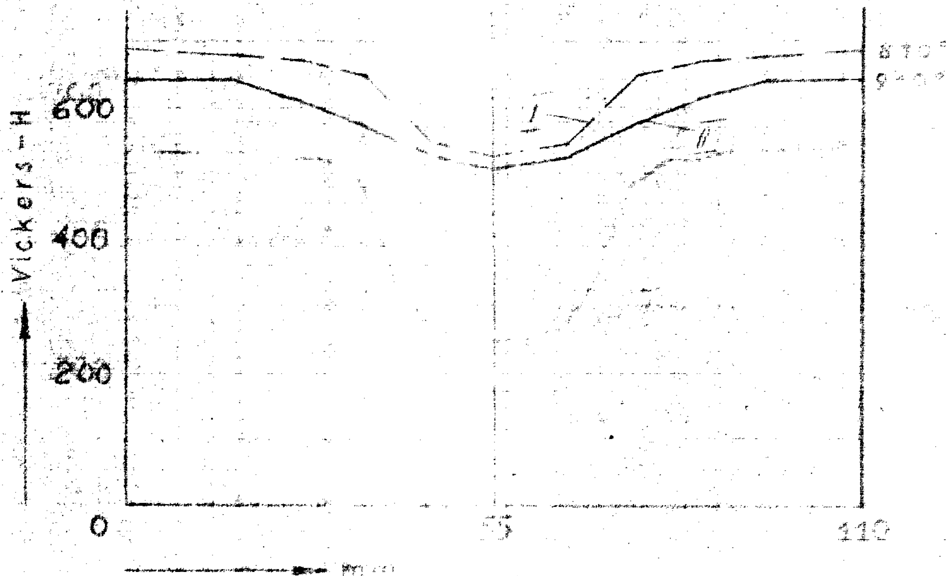


200.19

Abb. 19 Рис. 19

10246

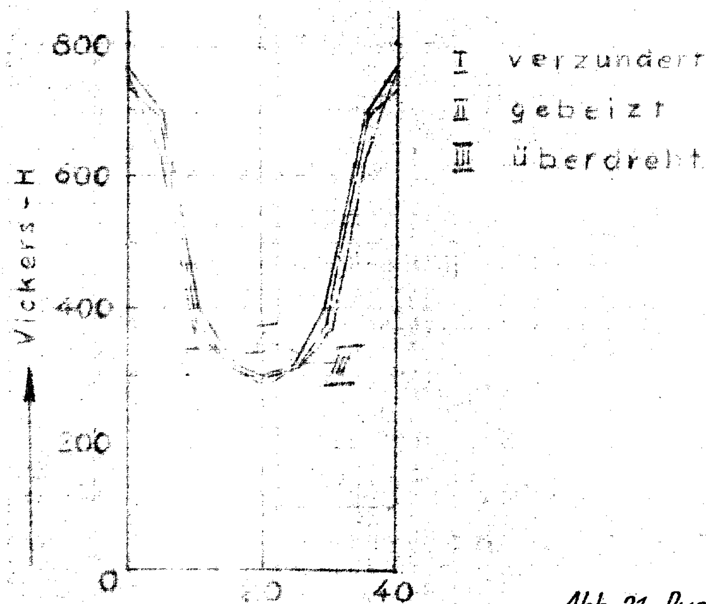
20



200.20

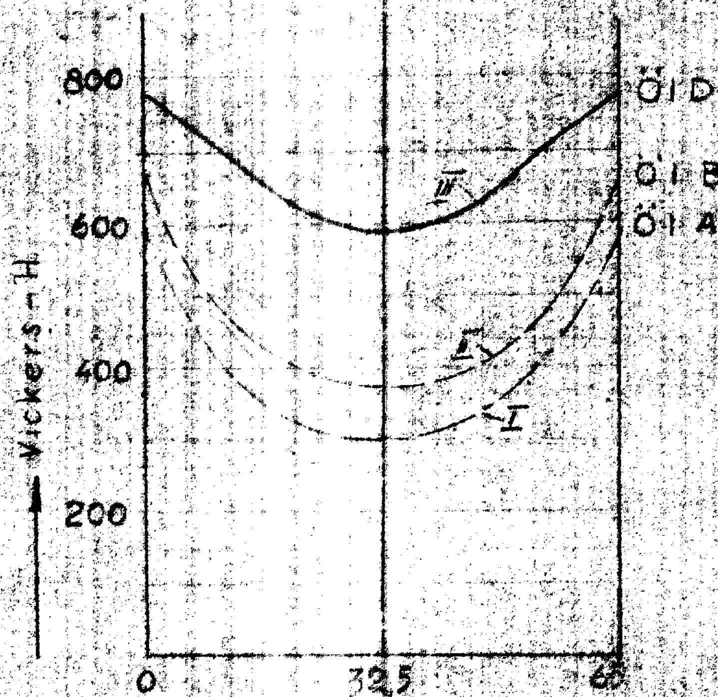
Abb.20 Рис.20

21



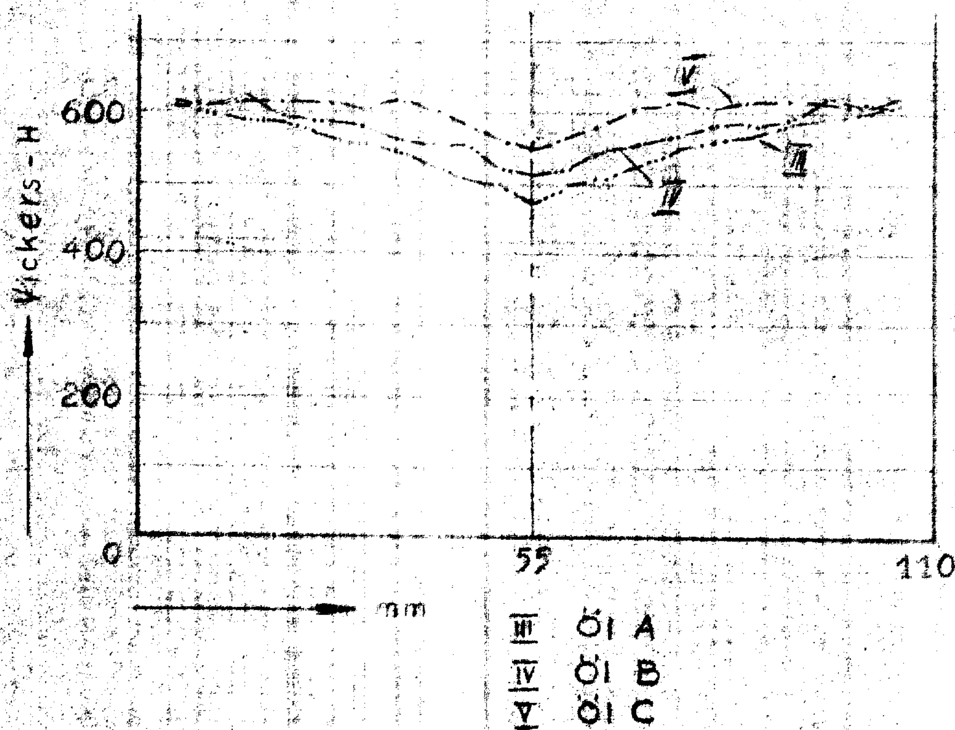
200.21

Abb.21 Рис.21



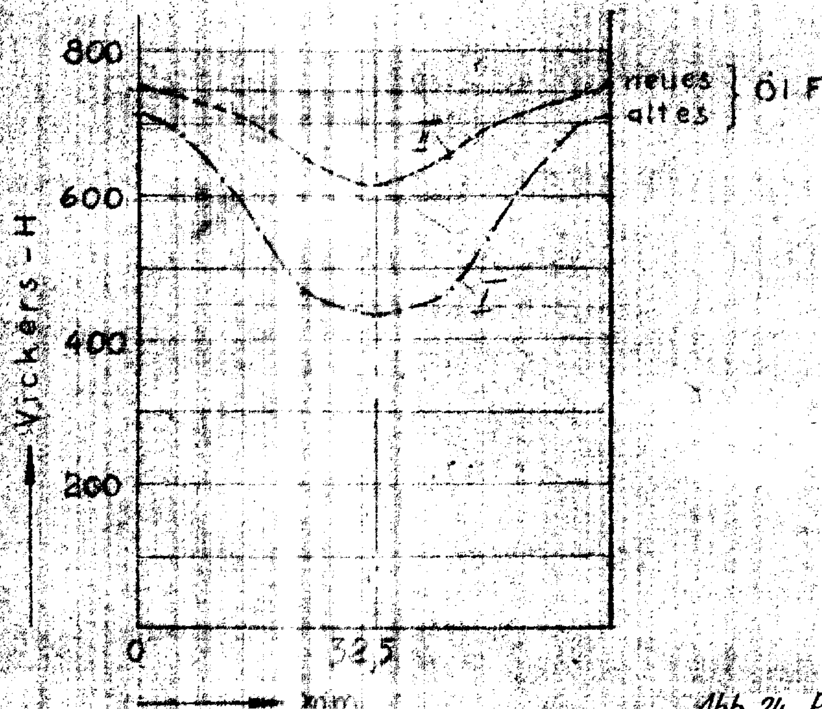
200.22

Abb. 22 Рис. 22



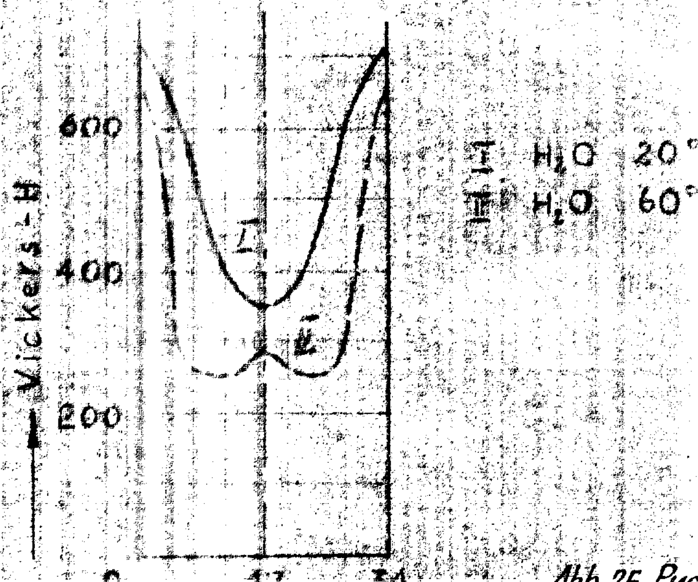
200.23

Abb. 23 Рис. 23



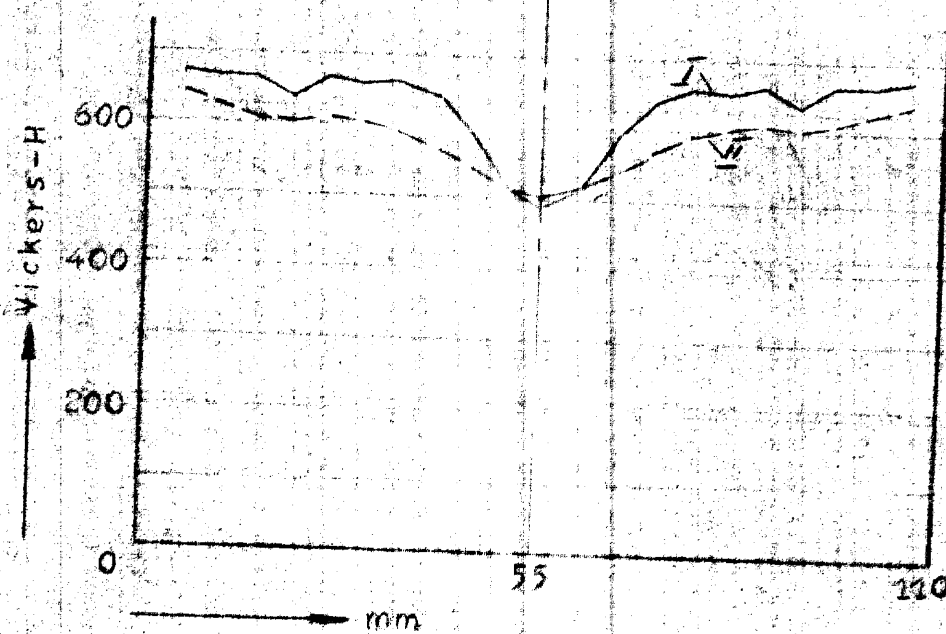
200.24

Abb.24 Рис.24



200.25

Abb.25 Рис.25



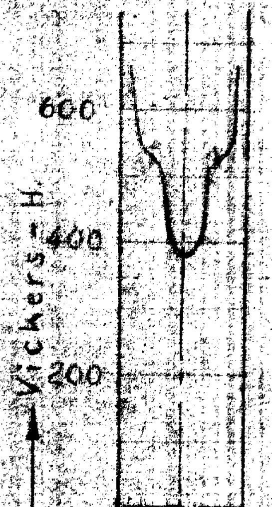
200, 26

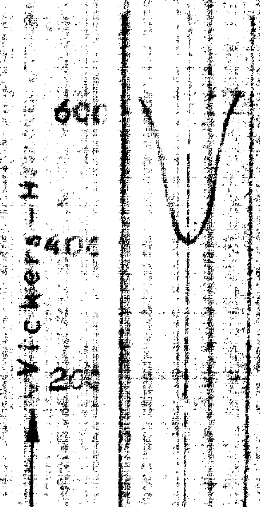
I H_2O 20°

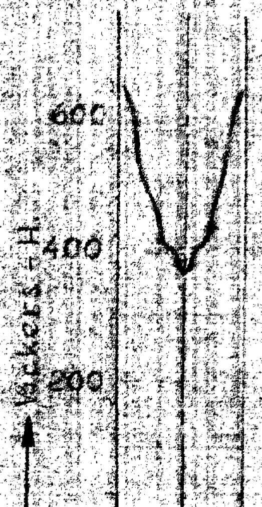
Abb. 26 Рис. 26

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

(27)





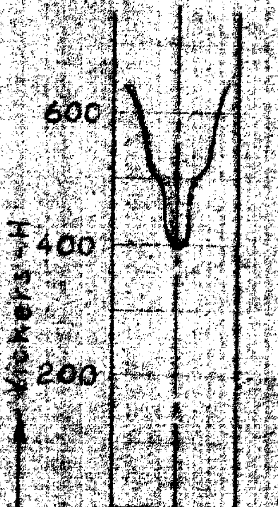


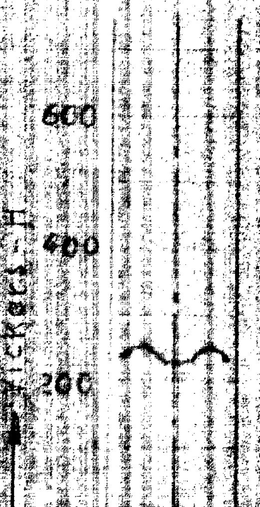
20° NaOH 50% NaCl 20% AS 140 106%

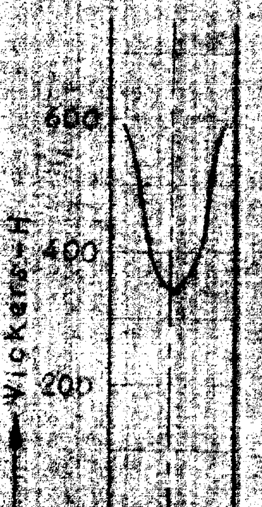
200.27

Abb. 27 Рис. 27

(28)







80° NaOH 50% NaCl 20% AS 140 106%

200.28

Abb. 28 Рис. 28

Berliner Technisch-wissenschaftliches Büro (BT/B)
des Ministeriums für Automobil-Industrie (MAI) der UdSSR
Abteilung Gasgeneratoren

B e r i c h t s w e r k

Stand und Ziele der konstruktiven Entwicklung und der wissenschaftlichen Forschung in Deutschland auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Schleppermotoren und der Treibstoffe

- - - - -

Bericht Nr. 211 Themat.Kennziffer IV/4

BEITRAG ZUR VERWENDUNG VON SCHWELKOKS IN HAUSBRANDFEUERUNGEN UND DIE ANPASSUNG DER BAULICHEN GESTALTUNG DIESER FEUERSTÄTTEN AN DIE BRENNEIGENSCHAFTEN DES SCHWELKOKSES

VERFASSER	DIPL.-ING.O. WEIMANN
Berichtsbetreuer u. Abteilungsleiter	Prof.Dr.-Ing.R. Drawe
Schriftleiter	Dr. M. Wiers
Hauptschriftleiter	Dipl.-Ing.R. Boye
Leiter des Sektors Redaktion und Übersetzung	Doz.Dr.-Ing.S. Traustel

<u>**Stellungnahme des Berichtsbetreuers**</u>

zum Bericht Nr. 211, them.Kennziffer IV/4

"Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schwelkokses"

Verfasser:	Dipl.-Ing. O. Weimann
Berichtsbetreuer:	Prof.Dr.-Ing.R. Drawe

Der Bericht stellt so erschöpfend und so richtig, wie es nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnisse möglich ist, die Anforderungen zusammen, die an mit Schwelkoks beheizte Hausbrandfeuerungen zu stellen sind, damit alle verbrennungstechnischen Vorzüge des Schwelkokses ausgenutzt werden können. Ich vermisse nur den Hinweis, den Weimann selbst an anderer Stelle einmal gebracht hat, daß es zweckmäßig ist, bei der Verfeuerung von Schwelkoks den Schornsteinzug nach oben durch eine festeingebaute unverstellbare Drosseleinrichtung im Gasabzug zu beschränken. Das soll geschehen, damit Ofenbeschädigungen und Verschlackungen vermieden werden. Schwelkoks ist der einzige feste Brennstoff, bei dem man eine solche Vorrichtung vorteilhaft verwenden kann.

Zu Seite 39 bemerke ich, daß man mit Rost versehene Kachelöfen mit Schwelkoks im Dauerbrand ausgezeichnet und wirtschaftlicher als bei der bisher üblichen Fahrweise betreiben kann - siehe den Bericht Drawe-Kayser, Nr. 3 von Drawe, Nr. 2 von Kayser, Sass Nr. 61 "Die Bewährung von Steinkohlen- und Braunkohlen-Schwelkoks in Kleinfeuerungen". S. 43-46 -

Aber selbstverständlich wird man keine Öfen dieser Art neu bauen, wenn von vornherein feststeht, daß sie nur mit Schwelkoks fahren sollen, ihr Vorteil ist immerhin, daß sie mit Schwelkoks, Braunkohlenbriketten und Gasflammkohlen brauchbar betrieben werden können.

Inhaltsangabe

zum Bericht Nr. 211 Themat.Kennziffer IV/4

"Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schwelkokses"

Verfasser: Dipl.-Ing. [illegible]. Heimann

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Eigenschaften des Schwelkokses behandelt, die sich nach Versuchen auf dem Prüfstand und in der Praxis als besonders wichtig und vorteilhaft für seine Verwendung in den Feuerstätten des Hausbrandes erwiesen haben. Anschließend wird dann näher auf die grundsätzlichen Forderungen, die der Betrieb der Feuerstätten im besonderen bei Verwendung von Schwelkoks verlangt, eingegangen. Im Hauptteil wird dann eine Übersicht über die einzelnen Feuerstätten selbst und ihre bauliche Anpassung an die Eigenschaften des Schwelkokses gegeben. Bei jedem Teilgebiet wird hier auf die Konstruktion, die als besonders günstig für die Verwendung von Schwelkoks anzusehen ist, hingewiesen.

Als Ergebnis der Arbeit ist zusammenfassend festzustellen, daß der Schwelkoks wie kein anderer Brennstoff dazu fähig ist, die Anforderungen auf allen Teilgebieten des Hausbrandes in idealer Weise zu erfüllen. Dank seiner nicht zu übertreffenden günstigen Brenneigenschaften gewährleistet er eine bis dahin nicht erreichte Wirtschaftlichkeit des Brennstoffverbrauchs der Feuerstätten, ferner bietet er der Hausfrau, weil sie die Feuerstätten spielend im Dauerbetrieb halten kann, große Arbeitserleichterung und Bequemlichkeit. Es ist daher damit zu rechnen, daß der stückige Schwelkoks, wenn er erst einmal in guter Qualität und Klassierung und in ausreichenden Mengen auf dem Markt verfügbar ist, leichten Absatz finden wird und daß für ihn auch gern ein höherer Preis geboten wird, als seinem Heizwert gegenüber anderen Brennstoffen entspricht. Dies wird mit dazu beitragen, die Kosten des Schwelprozesses günstig auf die einzelnen Produkte zu verteilen und damit die Treibstoffgewinnung durch Schwelung zu fördern.

Inhaltsverzeichnis

zum Bericht Nr. 211 Themat.Kennziffer IV/4

"Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schwelkokses"

Verfasser: Dipl.-Ing.O. Weimann

- - - - -

A. Grundsätzliche konstruktive Anforderungen an Feuerstätten für Schwelkoks

I. Die Brenneigenschaften

Der Schwelkoks zeichnet sich gegenüber den anderen im Hausbrand gebräuchlichen Brennstoffen durch folgende Eigenschaften aus:

1. Teerfreiheit,
2. ausgezeichnete Zündfähigkeit (niedriger Zündpunkt),
3. ausgezeichnete Dauerbrandfähigkeit,
4. schlackenlose Verbrennung.

Deshalb sind mit diesem Brennstoff in den Händen der Hausfrau oder sonstiger ungeschulter Personen kaum Fehlgriffe möglich, die eine Vergeudung des Brennstoffes oder einen vorzeitigen Verschleiß der Feuerstätten hervorrufen. Allerdings hängt dies auch wesentlich von der Konstruktion der Feuerung ab. Eine den besonderen Verbrennungseigenschaften dieses neuen Brennstoffes bestens angepaßte Feuerstätte wird im praktischen Dauerbetrieb wesentlich günstigere Ergebnisse bringen als eine andere, die in ihrem primitiven herkömmlichen Aufbau auch sonst schon ihren Zweck nur unvollkommen erfüllt.

II. Wichtige Forderungen für den Betrieb der Feuerstätten

Neben dem primären Ziel, den Brennstoff möglichst gut auszunutzen, müssen die häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe noch folgende Bedingungen erfüllen:

1. Gute Regelbarkeit. Bei Voll- und Teillast wie auch bei ausgesprochenem Einhalten des Feuers während der Betriebspausen sollen die Feuerstätten mit einem guten, etwa gleichbleibenden Wirkungsgrad betrieben

werden können.

2. Einfache Bedienung. An die Aufmerksamkeit des Bedienungspersonals dürfen keine hohen Ansprüche gestellt werden.

3. Stubenreinheit. Zusätzlicher Bedienungsaufwand für die Reinigung muß vermieden werden.

Diese Forderungen wurden in der früheren Zeit von den Herstellern nur wenig beachtet, oft sogar ganz vernachlässigt. Ihre Erfüllung ist aber von ausschlaggebender Bedeutung, weil sie die Liebe des Bedienenden zu der jeweils benutzten Feuerstätte erweckt, wodurch unmittelbar auch der Brennstoffverbrauch beeinflußt wird. Es ist ein unbestrittenes Verdienst der brennstoffschaffenden Industrie – insbesondere des Braunkohlenbergbaues, der seinen Hauptabsatz von jeher im Hausbrand hatte – , daß sie diese Forderungen erstmalig erhob und dann auch in sich immer mehr vertiefender Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen durchsetzte. Es ist angebracht, im Rahmen dieser Arbeit kurz darauf hinzuweisen, weil diese Erkenntnisse auch bei der konstruktiven Gestaltung der Feuerstätten für Schwelkoks galten.

2. Die Regelbarkeit des Abbrandes

Die Regelbarkeit hängt ab von der dichten Ausführung der Feuerstätten. Auch das sorgfältigst durchgebildete Regelorgan versagt, wenn durch undichte Stellen an Stoßfugen usw. Falschluft in die Feuerung und die Heizzüge eindringt. Abgesehen von der Verschlechterung der Wärmeabgabe, die durch die Verdünnung der Rauchgase und die damit verbundene Senkung der Rauchgastemperatur eintritt, ist dann der Abbrand in hohem Maße von dem Grad der Undichtheit abhängig. Außerdem ist er stärker Zufälligkeiten – wie Zugschwankungen infolge äußerer Witterungseinflüsse, Änderungen des Strömungswiderstandes infolge von Veraschung des Brennstoffbettes oder dgl. – ausgesetzt. Besonders

krass machen sich die Mängel bei schwacher Last und beim Dauerbrand bemerkbar. Rasche Brennstoffe, vor allem der Hochtemperaturkoks, sind gegenüber Undichtheiten der Feuerstätten, wenn sie nicht gar zu groß sind, verhältnismäßig unempfindlich. Anders steht es jedoch mit den stark reaktionsfähigen Brennstoffen, zu denen auch der Schwelkoks zu rechnen ist. Bei ihnen besteht die Gefahr, daß sie zu rasch abbrennen und daß infolgedessen in kurzer Zeit eine derart große Wärmemenge frei wird, so daß die Feuerungen verschlacken und zerstört werden.

Die Schädlichkeit undichter Stellen an den Feuerstätten ist je nach ihrer Lage verschieden zu bewerten. In erster Linie ist auf absolute Dichtheit des Aschenraumes, durch den in der Regel die Verbrennungsluft unter den Rost geführt wird, zu achten. Undichtheiten an dieser Stelle wirken sich unmittelbar auf die Regelfähigkeit aus, weil die hier eintretende Luft in voller Menge das Brennstoffbett durchstreicht und daher die Intensität der Verbrennung mitbestimmt. Von mittelbarem Einfluß ist die Falschluft, die oberhalb des Brennstoffbettes in die Feuerung und die Heizzüge eingesaugt wird. Sie wirkt sich auf die Regelbarkeit besonders bei schwachem Schornsteinzug ungünstig aus, weil die Luft sich stets den Weg des geringsten Widerstandes aussucht und damit die Gefahr besteht, daß die Hauptmenge der Luft hinter dem Feuerraum durch die undichten Stellen eingesaugt wird und im Feuerraum selbst Luftmangel herrscht. Auf Einzelheiten, wie diese Forderungen bei den verschiedenen Feuerstätten gelöst werden können, wird später näher eingegangen.

Besonders ist auf die Gestaltung des Regelorganes für die Frischluftzufuhr zu achten, damit der Vorzug des Schwelkokses, nämlich seine Dauerbrandfähigkeit, voll ausgenutzt werden kann. Einerseits soll der Querschnitt des Regelorganes, das aus Schieber, Rosette oder Klappe aus-

gebildet wird, bei voller Öffnung so groß sein, daß auch bei der zulässigen Höchstlast die erforderliche Verbrennungsluftmenge ohne unzulässig hohen Druckverlust hindurchströmt. Der Querschnitt ist daher so zu bemessen, daß er selbst bei einem schwachen Schornsteinzug ausreicht, der z.B. beim Anheizen aus dem kalten Zustand häufig unter 0,1 mm WS liegt. Auf jeden Fall soll vermieden werden, daß die Aschentür zum schnelleren Ingangbringen des Feuers beim Anheizen geöffnet werden muß; dadurch wird nämlich die vielfach anzutreffende Unart unterstützt, auch während des weiteren Betriebes die Aschentür offen zu halten. Dies bringt neben außerordentlicher Brennstoffvergeudung die Gefahr mit sich, daß die Feuerstätte infolge der Überanstrengung zerstört wird. Wegen der hohen Reaktionsfähigkeit des Schwelkokses und seiner daraus herrührenden Neigung zum "Durchgehen" muß dieser Zusammenhang bei der konstruktiven Durchbildung entsprechend berücksichtigt werden. Umgekehrt ist beim Schwachlastbetrieb eine gute Feinregelung der Verbrennungsluftmenge unbedingt erforderlich, damit ein möglichst langer Dauerbrand, für den ja der Schwelkoks die besten Voraussetzungen bietet, erzielt werden kann. Ein Regler (Schieber, Rosette oder d.l.), dessen freier Querschnitt proportional dem Öffnungsweg veränderlich ist, genügt nicht (s. Abb. 1 a). Es ist vielmehr erforderlich, daß im unteren Bereich die Begrenzungskante der Regleröffnung parabelförmig verläuft (s. Abb. 1 b und 1 c). Strömungsmessungen, bei denen jeweils die "gleichwertige Düsenöffnung" errechnet wurde, zeigten nämlich, daß schon ganz geringe Vergrößerungen des Luftquerschnitts die durchströmende Luftmenge erheblich verändern und daß das Feuer nur mit Erfolg geregelt werden kann, wenn der Regler gemäß Abb. 1 b und 1 c ausgebildet wird. Durch die Drosselung des Reglerganges wird ein zusätzlicher Widerstand in den Luftweg gelegt, der nur [illegible] werden kann, wenn an keiner

Stelle hinter ihm Undichtheiten vorhanden sind, die seine Wirkung wieder aufheben. Bei der Verfeuerung von Schwelkoks ist dieser Umstand bedeutsam, weil man anstrebt, in Betriebspausen die Glut und damit die Betriebsbereitschaft der Feuerstätten aufrecht zu erhalten, ohne daß ein nennenswerter Verbrauch eintritt.

b. Einfache Bedienung

Der Forderung nach möglichst einfacher Bedienung kommt der Schwelkoks im Gegensatz zu den bituminösen Brennstoffen durch seine Eigenschaften von Haus aus schon entgegen. Während bei diesen der Luftbedarf in den einzelnen Verbrennungsstufen so verschieden ist, daß es nicht immer möglich ist, die Heizleistung der Feuerstätte dem jeweiligen Wärmebedarf anzupassen, kann die Intensität des Schwelkoksfeuers annähernd so gut geregelt werden wie die Flamme eines Gasbrenners. Daraus ergibt sich für den Konstrukteur die Forderung, den Bedienungsmechanismus der Feuerstätte so einfach zu gestalten, daß sich die Arbeit der Hausfrau nur auf wenige Handgriffe beschränkt. Es sind dies das Regeln der Luftmenge mit den Luftregelorganen, das gelegentliche Entfernen der Asche vom Rost und die Betätigung der Anheiz- oder Umstellklappe. Selbst der letztgenannte Handgriff ist, so selbstverständlich er auch erscheinen mag, schon unerwünscht, weil er häufig vergessen wird; eine ungenügende Ausnutzung der Rauchgaswärme ist dann die Folge. Anheizklappen, die zusätzliche Quellen für Undichtigkeiten innerhalb der Rauchzüge darstellen, sind daher nur als Notbehelf bei ungenügendem Schornsteinzug zu werten. Bei Feuerstätten, die im Dauerbetrieb mit Schwelkoks arbeiten, sind sie im allgemeinen überflüssig.

9. Stubenreinheit

Schließlich seien noch einige grundsätzliche Bemerkungen zur Frage der "Stubenreinheit" der Feuerstätten vorweggenommen. Wenn es sich um gut klassierten, bergefreien Schwelkoks aus Steinkohle handelt, ist die Frage von geringerer Bedeutung. Der Aschegehalt ist bei ihm verhältnismäßig niedrig, außerdem ist die Steinkohlenasche spezifisch schwer und nimmt daher nur einen geringen Raum ein. Die übliche Größe der Aschenkästen reicht zur Aufnahme der täglich oder auch während eines längeren Zeitraums anfallenden Asche aus. Anders steht es jedoch beim Koks, der bei der Schwelung der Braunkohle anfällt. Ein eigenartiges Zusammentreffen ist es, daß gerade die Braunkohlen, die wegen ihres hohen Teergehaltes allein als schwelwürdig anzusprechen sind, auch den höchsten Aschegehalt aufweisen. Infolge der Gewichtsverringerung der brennbaren Substanz beim Schwelen steigt der Aschegehalt durchschnittlich auf 20 und mehr Gewichtsteile an. Hinzu kommt, daß die Braunkohlenasche spezifisch leicht und daher sehr voluminös ist. Die Aschenräume und bei Einzelfeuerstätten die Aschenkästen sind daher entsprechend groß zu bemessen. Ferner ist dafür zu sorgen, daß durch geeignete Leitvorrichtungen die Asche mit Sicherheit in den Aschenkasten fällt. Nichts ist für die Hausfrau lästiger, als wenn bei jedem Öffnen der Feuer- oder Aschentür Asche vor die Feuerstätte fällt und sie diese nachträglich entfernen muß.

B. Die bauliche Gestaltung der Feuerstätten

Hinsichtlich der Konstruktion der Feuerung sind zwei Typen von häuslichen Feuerstätten zu unterscheiden:

Solche, von denen kurzzeitig eine hohe Wärmeleistung verlangt wird und bei deren Betrieb längere Betriebspausen auftreten. Erwünscht ist hier Dauerbrandfähigkeit des Brennstoffes, die ein Durchhalten des Feuers ermöglicht und damit das lästige Neuanheizen erspart.

Solche, von denen eine dauernde, möglichst gleichbleibende Wärmeabgabe verlangt wird. Am idealsten wird diese Forderung durch einen Brennstoff erfüllt, dessen [illegible] auch im Verlaufe der Verbrennung möglichst [illegible] bleibt.

Von der ersten Gruppe kommen für die Verwendung von Schwelkoks vor allem in Betracht die Kochherde, Badeöfen und Heißwasserbereiter für kleine Anlagen.

Die zweite Gruppe umfasst alle Einzelöfen für Raumheizung sowie die Zentralheizungskessel.

I. Die Kochherde mit offener Herdplatte oder geschlossenem Kochraum

Für die Speisenbereitung mit festen Brennstoffen haben sich im Laufe der Zeit zwei Typen von Herden herausgebildet. Bei der einen Type wird auf der offenen Herdplatte gekocht. Für besondere Zwecke, nämlich das Braten und Backen, haben diese Herde in der Regel noch zusätzlich einen geschlossenen Bratofen, der entweder von einer besonderen Feuerung beheizt wird (Abb. 2 a) oder bei dem die Rauchgase des Herdes ausgenutzt werden, das zur Beheizung der Herdplatte dient (Abb. 2 b). Bei einer weiteren Bauart ist der Kochraum schrankartig geschlossen,

und er wird gleichzeitig für das Kochen, Braten und Backen benutzt. Mitunter sind, wie es z.B. bei den größeren Grudeherden üblich ist, zwei Kochräume übereinander angeordnet. Die Verbrennungsgase werden in Zügen seitlich und oberhalb der Kochräume entlanggeführt (s. Abb. 2 a).

In beiden Herdbauarten zeigt sich der Schwelkoks gegenüber den anderen bisher gebräuchlichen Brennstoffen, wie Braunkohlenbriketts und Steinkohle, überlegen. Die ausgezeichnete Zündfähigkeit erleichtert der Hausfrau das Anfeuern außerordentlich; die bequeme Regelbarkeit ermöglicht ihr, Speisen, die längere Zeit zum Garen benötigen, ohne ständige Beaufsichtigung und Bedienung der Feuerung kochen zu lassen; die gute Dauerbrandfähigkeit hält ihr den Herd stets betriebsbereit; Rauch- und Rußfreiheit ersparen ihr viel Arbeit, die sonst für das Reinigen der Herdzüge und auch der Töpfe aufgewendet werden muß.

Es erhebt sich nun die Frage, ob, von der Verwendungsmöglichkeit des Schwelkokses abgesehen, beide vorher erwähnten Herdbauarten gleichwertig sind, oder ob der einen vor der anderen der Vorzug zu geben ist. Vom wärmewirtschaftlichen Standpunkt aus ist das Kochen im geschlossenen Raum dem auf der offenen Platte entschieden überlegen. Bei der geschlossenen Bauart wird die Wärme von allen Seiten an das Kochgut herangebracht, so daß Mantel und Deckel der Kochtöpfe, die beim Kochen auf der offenen Herdplatte unerwünschte Abkühlungsflächen darstellen, hier mitbeheizt werden. Das zeigen auch eingehende Versuche, die der Verfasser auf dem Prüfstand des Ostelbischen Braunkohlensyndikats durchführte. Die Versuchsprotokolle und Auswertungen sind leider bei den Bränden des Syndikatsgebäudes in Berlin restlos vernichtet worden. Während bei Prüfversuchen nach den Vorschriften der Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für eiserne Dauerbrandherde [1] 1)

1) Die Zahlen in [] eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttum am Ende der Arbeit, S. 57.

- im folgenden kurz Kochwirkungsgrad genannt - bei den testkonstruierten Herden Kochwirkungsgrade zwischen 15 und 24 % ermittelt wurden, betrugen diese bei einem Schrankherd unter den gleichen Bedingungen 36 bis 42 %. Diese Wirkungsgrade gelten für Vollast, d.h. wenn die der Normalleistung der betreffenden Herdgrößen entsprechende Wärmemenge stündlich durch Verbrennung freigemacht wird. Bei Teillast fällt bei den offenen Herden die Wirkungsgrad-Kurve steil ab, weil die Wärmeabgabe des Kochgutes an den Raum bald höher als seine Wärmeaufnahme ist. Es ist daher, wenn man diese Herde dauernd in Betrieb hält, mit einem beachtlichen Brennstoffverbrauch allein zur Deckung der Leerlaufverluste zu rechnen. Demgegenüber verläuft die Wirkungsgradkurve bei Herden mit geschlossenem Kochraum (Schrankherden) wesentlich flacher. Auch hier treten selbstverständlich Leerlaufverluste auf, weil sich die Wärmeabgabe der Kochmasse durch die Außenwände nicht ganz vermeiden läßt. Sie können aber durch Wahl geeigneter Baustoffe, wie später noch angegeben wird, erheblich eingeschränkt werden.

In der Abb. 5 ist der ungefähre Verlauf der Wirkungsgrade η für beide Herdtypen und für verschiedene Brennstoffe in Abhängigkeit von der Brennstoffwärmeleistung Q der Herde angedeutet. Da die betreffenden Unterlagen nicht mehr zur Verfügung stehen, wurden die Kurven nach dem Gedächtnis wiedergegeben und können also nur die Tendenz angeben, lassen aber keine zahlenmäßig genauen Ergebnisse abgreifen. Das Diagramm gibt aber einen interessanten Einblick in die Zweckmäßigkeit der beiden Herdtypen und in ihre Eignung für die verschiedenen Brennstoffe. Zunächst fällt auf, daß der Kochwirkungsgrad beim Schrankherd für alle Brennstoffe höher liegt als beim offenen Herd. Die Begründung hierfür wurde schon früher gegeben. Dann ist aber auch festzustellen, daß der Schwelkoks in beiden Feuerstätten den anderen Brennstoffen an und für sich überlegen ist.

Hierfür sind mehrere Gründe maßgebend. Einmal fallen alle Verluste, die durch unvollkommene Verbrennung der Schwelprodukte bei Steinkohle und Braunkohlenbriketts in mehr oder minder hohem Maße entstehen, weg. Die Neigung des Schwelkokses zur CO-Bildung ist bei der niedrigen Brennstoffschicht gering, so daß auch kein nennenswerter Verlust infolge unvollkommener Verbrennung eintritt. Ferner verläuft die Verbrennung durchschnittlich mit geringerem Luftüberschuß, weil der Schwelkoks, gleichgültig ob aus Stückkohle oder Briketts erschwelt, eine kleinere Korngröße hat als z.B. Braunkohlenbriketts und daher auch bei flachem Feuer in mehreren Lagen übereinander liegt. Dadurch bleibt der Rost, auch wenn das Feuer schon weit heruntergebrannt ist, immer noch gut bedeckt, da die durch Ausbrand eines Teiles der Koksstücke entstehenden Lücken sich von selbst durch Nachrutschen des Brennstoffes wieder ausfüllen. Dies macht ein Eingreifen der Hausfrau in den Verbrennungsablauf, wie es beispielsweise bei den großstückigen Braunkohlenbriketts oder bei backender Steinkohle ständig erforderlich ist, überflüssig und wirkt sich besonders im Dauerbrand, während dessen das Feuer sich selbst überlassen bleibt, vorteilhaft aus. Die gleichbleibende Bedeckung des Rostes ist auch ein Hauptgrund, daß der Feuerungswirkungsgrad im Teil- und Schwachlastbetrieb bei Schwelkoks höher liegt. Auch auf eine andere Tatsache, die zugunsten des Schwelkokses spricht, sei noch hingewiesen. Bei den anderen Brennstoffen reißt die Wirkungsgradkurve teilweise schon dann ab, bevor sie die Nullinie erreicht, d.h. es ist bei ihnen nicht möglich, die Leistung so weit zu drosseln, daß der Brennstoff nur noch weiter glimmt, und also die freigemachte Wärme gerade zur Deckung der Abstrahlungsverluste des Brennstoffbettes ausreicht. Bei ihnen muß man daher, wenn man Betriebspausen überbrücken will, einen wesentlich höheren Brennstoffverbrauch in Kauf nehmen. Daß bei den geschlossenen

Herd die Kurve des Schwelkokses im unteren Belastungsbereich noch ziemlich flach liegt, und die Kurven der anderen Brennstoffe weiter als beim offenen Herd laufen, ist in der geringen Wärmeabstrahlung des Feuerbettes an die wärmeren Umfassungswände des Feuerraumes zu suchen.

Nachdem bisher die allgemeinen und grundsätzlichen Gesichtspunkte, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen, besprochen sind, sollen jetzt konstruktive Einzelheiten der Herde, soweit sie auf die Verwendung des Schwelkokses Bezug haben, behandelt werden. In dem Bestreben, die Qualität der fabrikmäßig hergestellten Feuerstätten allgemein zu heben und minderwertige Konstruktionen auszumerzen, wurden von den Brennstoffsyndikaten in den letzten Vorkriegsjahren Richtlinien aufgestellt, die dann nach eingehenden Beratungen mit der einschlägigen Industrie von der Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft als "Bau-Güte- und Prüfbestimmungen" herausgegeben wurden. Da in ihnen die letzten Erfahrungen und Ergebnisse der Untersuchungen berücksichtigt sind, ist es gerechtfertigt, die folgenden Betrachtungen an diese Bestimmungen anzulehnen.

a. Der Herd mit offener Kochplatte

Rostgröße und Ausführung.

Bei der Bemessung des Rostes und der Feuerraumhöhe ist von der Normalleistung der Herde auszugehen. Diese ist nach den langjährigen Erfahrungen der Herdfabriken, die durch eingehende Reihenuntersuchungen, vornehmlich auf den Prüfständen der Brennstoffsyndikate ergänzt waren, festgelegt. Einen Anhalt über die Leistung der üblichen Größen der eisernen Herde gibt Zahlentafel 1.

Zahlentafel 1

Leistungszahlen, Gesamtrostflächen und Rostflächenbelastungen für verschiedene Herdgrößen

Herdgröße	Abmessungen der gesamten Herdplatte cm x cm = cm²	Mindest-Gesamt-Leistung 2) kcal/h	Frühere Rostfläche cm x cm = cm²	Rostwärmebelastung kcal/m²h	jetzige Rostfläche bei 250 000 kcal/m²h Rostwärmebelastung cm²
I	70 x 51 = 3570	4600	20 x 15 = 300	220 000	263
II	80 x 51 = 4080	5400	22 x 16 = 352	220 000	310
III	86 x 57 = 4900	5800	22 x 16 = 352	235 000	330
IV	92 x 62 = 5700	6200	22 x 16 = 352	250 000	354
V	100 x 65 = 6500	6800	22 x 20 = 440	220 000	388

Für die Bemessung der Rostgröße wurde bei den Kohlenherden seinerzeit eine durchschnittliche Rostwärmebelastung von 220 000 kcal/m²h zugrundegelegt. Ursprünglich waren die Roste allgemein größer, also ihre Wärmebelastung noch niedriger. Dem Wunsche der Braunkohlenindustrie, die Rostflächen noch kleiner auszuführen, glaubte man damals nicht folgen zu können. Es stellte sich jedoch heraus, daß sie für den üblichen Gebrauch doch noch zu groß sind, da der Teillastbetrieb - die Herdfläche ist nur selten und dann kurzzeitig besetzt - überwiegt. Ohne Beeinträchtigung der Leistung - maßgebend ist hierbei, daß die für das Backen und Braten verfügbare Wärme noch ausreicht - konnte der Brennstoffverbrauch ganz beträchtlich gesenkt werden, wenn die Rostwärmebelastung für die angegebene Normalleistung auf über 250 000 kcal/m²h erhöht wurde. Die geänderten

---

2) Unter Gesamtleistung wird die Wärmemenge verstanden, die für Kochen und Raumerwärmung verbleibt, d.h. die Differenz zwischen der im Brennstoff chemisch gebundenen Wärmemenge (Heizwert) und den Verlusten durch freie und gebundene Wärme der Rauchgase und Unverbranntes in den Herdrückständen.

Rostflächen sind in der letzten Spalte der Zahlentafel 1 angegeben. In einer für den Praktiker geläufigeren Faustformel beträgt dann die Rostfläche etwa 1/10 der "wirksamen Kochfläche"[3]. Diese Rostgrößen haben sich bei den Versuchen mit Schwelkoks als die günstigsten erwiesen.

Hinsichtlich der Ausführung der Roste besteht keine Veranlassung, von den im DIN-Blatt 1293 festgelegten Abmessungen - Spaltweite 7,5 ± 0,3 mm und Gesamtbreite Stab + Spalt = 18 mm - abzugehen. Bei einigermaßen stückfestem Koks und nicht zu hohem Anteil an Unterkorn und Grus ist dabei der Rostdurchfall unbedeutend.

Der Rost kann entweder als festliegender Planrost oder auch als beweglicher Schüttel- oder Schieberost, der eine bequeme Entaschung ermöglicht, ausgebildet werden. Näheres darüber wird an späterer Stelle noch gesagt.

Die weiteren Einzelheiten seien anhand der Schnittzeichnung eines "Umbrandherdes", der den am weitesten verbreiteten Typ darstellt, erläutert, Abb. 2 b.

Feuerraumhöhe

Die Feuerraumhöhe, die in den BGP mit Rücksicht auf die Verfeuerung gasreicher Steinkohlen einheitlich für alle Herde auf 18,5 ± 0,5 cm festgelegt ist, erscheint für Schwelkoks zu hoch. Einmal ist ein derartiger Abstand von der Rostfläche zur Herdplatte nicht erforderlich, da der Schwelkoks fast ohne Flamme verbrennt. Ruß wird nicht ausgeschieden, da unvollständige Verbrennung infolge von Unterkühlung der bei der Entgasung des Brennstoffs entwei-

---

3) Unter "wirksamer Kochfläche" wird hier die Herdplatte ohne Rahmen und abzüglich der hinteren Flächen, sofern dort ein Wasserkessel eingehängt ist, verstanden.

ehenden Gase nicht auftritt. Zum anderen ist es sogar erwünscht, den Brennstoff möglichst nahe an die Platte heranzubringen, damit bei schwacher Belastung und niedriger Schütthöhe die frei gemachte Wärme in möglichst hohem Maße dem Kochgut zugeführt wird. Grenzen für den Rostabstand sind dadurch gezogen, daß zwischen Rost und Plattenrahmen noch genügend Platz für den Einbau einer Feuertür verbleiben muß, auf die zwecks bequemer Beschickung der Feuerung nicht verzichtet werden sollte.

Zugquerschnitte bei Umbrand- und Rundzugherden

Die Rauchzüge oberhalb, seitlich und unterhalb des Bratofens können enger als bei Kohlefeuerung gehalten werden. Die Verbrennung verläuft beim Schwelkoks zeitlich gleichmäßig, weil seine brennbare Substanz auch während des Verbrennungsablaufs homogen bleibt. Deshalb weist auch die entstehende Rauchgasmenge keine großen Schwankungen auf. Im Gegensatz dazu treten bei Verfeuerung von Stein- und Braunkohlen während der Entgasungsperiode steile Spitzen in der Rauchgasentwicklung auf. Um sie ordnungsgemäß abzuführen und einen Rückstau zu vermeiden, ist es erforderlich, bei diesen Brennstoffen die Zugquerschnitte von vornherein weiter zu bemessen. Einen Anhalt für die zweckmäßige Bemessung der Zugquerschnitte bei Schwelkoks gibt Zahlentafel 2.

Zahlentafel 2

Feuerraumhöhe, Höhe der Züge am Bratofen und Rauchrohrdurchmesser für verschiedene Herdgrößen

Herdgröße	Feuerraumhöhe cm	Höhe der Züge am Bratofen oberhalb cm	seitl. cm	unterhalb cm	Rauchrohrdurchmesser ∅ mm
I	14	5	6	6	120
II	15 - 16	6	7	7	130
III	15 - 16	6	7	7	130
IV	15 - 16	6	7	7	130
V	17	7	8	8	145

Das Volumen der Rauchgase nimmt entsprechend ihrer Temperatur vom Feuerraum zum Rauchabzug hin ab. Man strebt, um den Zugbedarf des Herdes niedrig zu halten, eine einigermaßen gleichbleibende Geschwindigkeit an. Bei der konstruktiven Festlegung der Zugquerschnitte ist deshalb darauf zu achten, daß sie bis zum Rauchabzug entsprechend der Volumenverringerung der Rauchgase abnehmen. Auf jeden Fall sind plötzliche Querschnittsänderungen, vor allem Zugerweiterungen zu vermeiden, weil sie tote Räume schaffen und zu schädlichen Wirbelbildungen Anlaß geben. Damit man sich beim Konstruieren Klarheit über die Verhältnisse verschafft empfiehlt es sich, die aufeinander folgenden Zugquerschnitte in ein Stufendiagramm einzutragen (Abb. 5), anhand dessen etwa erforderliche Änderungen durchzuführen sind. Die Verbindungslinie der einzelnen Querschnittsstufen soll möglichst auf einer Linie liegen.

Ebenso wie bei den Zugquerschnitten wären auch bei den Rauchrohrstutzen geringere Durchmesser als bei den Kohleherden zulässig. Mit Rücksicht auf eine einheitliche Ausführung werde an dem in den BGP festgelegten Rauchrohrdurchmesser festgehalten.

Genügende und gleichmäßige Erwärmung des Bratofens

Die Herdbauart, wie sie in Abb. 2 b dargestellt ist und wie sie ausnahmslos bei fabrikmäßig hergestellten Herden aus Stahlblech angewendet wird, hat einen Mangel, der darin besteht, daß der Wasserkessel unmittelbar neben dem Bratofen liegt, der ihn in seiner Beheizung beeinflußt. Dadurch, daß der Wasserinhalt einen erheblichen Teil der Rauchgaswärme aufnimmt, wird die ausreichende Erwärmung des Bratofens in Frage gestellt. Ein Mittel, diesen Mangel zu beheben, besteht darin, daß der Bratofen gegen den Wasserkessel durch eine Wand, die entweder aus Stahlblech oder einer Schamotteplatte besteht,

abgeschirmt wird (s. Abb. 5). Wenn trotzdem diese Herdbauart allgemein Eingang gefunden hat, so ist das darauf zurückzuführen, daß sie eine einfache, raumsparende und in der Fabrikation billige Bauweise ermöglicht.

Vom heiztechnischen Standpunkt aus ist jedoch eine andere Bauweise, bei der die Feuerung in der Mitte des Herdes liegt, entschieden vorzuziehen (Abb. 4). Sie wird vielfach bei ortsfesten Kachelherden angewendet. Die Verbrennungsgase ziehen zuerst unter der Herdplatte entlang, umspülen dann den Bratofen und werden erst zum Schluß um den Wasserkessel herumgeführt. Die Hauptfunktionen des Herdes - das Kochen und Braten - werden hier also nicht beeinträchtigt. Dadurch, daß die ganze Bodenfläche des Herdes von den Rauchgasen berührt wird, ist auch ihr Anteil an der Raumerwärmung höher. Im Wasserkessel wird ein Teil der restlichen Rauchgaswärme ausgenutzt.

Die gleichmäßige und ausreichende Erwärmung des Bratofens läßt bei Herden mit offener Kochplatte häufig zu wünschen übrig. Begreiflicherweise ist die Erwärmung auf der Seite der Feuerung und im hinteren Teil des Bratofens größer, weil dort die Abstrahlung der Wärme nach außen nicht so stark ist; eingeschobene Kuchen werden daher an diesen Stellen stärker bräunen und oft gar verbrennen. Ebenso ist häufig die Unterhitze ungenügend. Aus diesem Grunde wurden früher die Herde mit einer Sonderfeuerung unter dem Bratofen versehen. Diese Ausführung ist aber nicht gutzuheißen, weil sie für die Hausfrau eine Verdoppelung der Arbeitsleistung ergibt. Wenn die Ursachen für die ungleichmäßige Erwärmung des Bratofens bei der Umbrandfeuerung erkannt sind, ist es jedoch leicht, sie zu vermeiden.

Einmal muß der Bratofen gegen die Rauchzüge dicht sein. Den Bratkasten hinten und an den Seiten durch Nieten oder Verschweißen der Blechwände dicht auszuführen, bietet

keine Schwierigkeit. Eine gefährliche Falschluftquelle befindet sich jedoch bei der üblichen Ausführung am Boden des Bratofens, Abb. 7 a. Dieser wird zum Herausziehen eingerichtet, damit man die Flugasche aus dem Bodenzug gelegentlich entfernen kann. Damit wird eine gesonderte, die Herstellung verteuernde Reinigungstür erspart. Das Bodenblech ruht an den Seiten in Blechfalzen, vorn liegt es jedoch meist ohne besondere Dichtung auf dem Türrahmen auf, so daß hier leicht Falschluft in den Bodenzug eintritt. Infolge der Mischung und Verdünnung der Rauchgase wird nicht nur die Temperatur erniedrigt und dadurch der Wirkungsgrad verschlechtert, sondern viel schlimmer äußert sich die Wirkung darin, daß die heißen Gase durch die Kaltluft nach hinten abgedrängt werden und der Bratofen vorn kalt bleibt. Er ist dann für manche Zwecke, vor allem das Backen, gänzlich unbrauchbar. Abhilfe ist hier auf verschiedene Weise möglich. Das Einlegen eines Asbeststrickes in die Sicke des Bodenbleches (Abb. 7 b) ist zwar recht wirksam, stellt jedoch keine ideale Lösung dar, da der Strick sich allmählich abnutzt und spröder wird und überdies aus Unkenntnis mitunter weggelassen wird. Konstruktiv nicht zu beanstanden ist die in Abb. 7 c dergestellte Ausführung, bei der der Bratofenboden aus einem gußeisernen Rahmen mit eingelegtem Reinigungsdeckel hergestellt ist. Der Deckel, der zwecks Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Fläche noch mit Rippen versehen werden kann, ruht in einen Falz, der mit feinem Sand oder Flugasche zur besseren Abdichtung ausgefüllt wird. Ebenso ist selbstverständlich die vollkommen dichte Ausführung des Bratofens und das Anbringen einer gesonderten Reinigungstür, die allerdings auch dicht schließen muß, ~~einwerdfrei~~ (Abb. 7 d). Für die gleichmäßige Temperaturverteilung im Bratofen wirkt sich auch vorteilhaft aus, wenn seine Decke durch Aufnieten oder elektrisches Anpunkten eines zweiten Bleches gegen zu starke Wärmeaufnahme abgeschirmt wird, Abb. 7 e. Ferner ist es empfehlunswert,

die Kanten des Bratofenraumes stark abzurunden, damit eine glatte, ebenfalls zur gleichmäßigen Erwärmung des Bratofenraumes beitragende Strömung der Rauchgase erreicht wird. Sie wird zweckmäßigerweise verstellbar eingerichtet, um den Querschnitt an der Umkehrstelle den vorhandenen Zugverhältnissen anzupassen.

Schließlich ist der Rauminhalt des Bratofens nicht größer zu bemessen, als es für die darin zu bereitenden Speisen erforderlich ist und der Leistungsfähigkeit der Feuerung entspricht. Vor allem ist es wichtig, den Bratofen nicht zu hoch zu bauen. Je mehr sich der Querschnitt des Bratofens der quadratischen Form nähert, um so geringer wird das Verhältnis seiner Heizfläche zum Rauminhalt. Hingegen wird die Wirkung nicht beeinträchtigt, wenn der Bratofen breiter als bisher üblich ausgeführt ist (vgl. Abb. 7 f). Der Zugbedarf erhöht sich dadurch praktisch nicht. Er steigt jedoch erheblich an mit zunehmender Länge des Überzuges, weil die Rauchgase gezwungen werden, entgegen dem natürlichen Auftrieb abwärts zu strömen. Dadurch wird oft, besonders bei ungünstigen Zugverhältnissen, das einwandfreie Arbeiten des Herdes gestört. Mitunter wird der Einwand erhoben, daß eine gewisse Bratofenhöhe nicht unterschritten werden darf, weil sie sonst, z.B. für Topfkuchen und dgl., nicht ausreicht. Dies trifft jedoch nicht zu. Bei höheren Bratöfen helfen sich die Hausfrauen in der Regel dadurch, daß sie Steine unterlegen, um die Kuchenformen näher an die Bratofendecke zu bringen. Der nutzbare Inhalt des Bratofens wird erheblich vergrößert, wenn er breit ausgeführt wird, da man dann entsprechend große Backbleche oder mehrere Töpfe einsetzen kann.

Wenn diese Erörterungen auch für Herde für alle anderen Brennstoffe gelten, so sind sie an dieser Stelle um so mehr berechtigt, als gerade der Schwelkoks eine vielseitige Benutzung des Bratofens zuläßt. Da bei ihm die Leistung bis auf ganz schwache, vor allem auch auf die Dauer konstant einzuhaltende Wärmeabgabe herabgesetzt werden kann, ist es möglich, den Bratofen in idealer Weise für das immer mehr an Bedeutung gewinnende Dörren von Obst und Gemüse zu gebrauchen. Ebenso kann er zum Einkochen von Konserven benutzt werden, ohne daß die Gläser oder Büchsen in ein Wasserbad gestellt zu werden brauchen. Bei anderen Brennstoffen ist dies nicht so gut möglich, weil ihre Regelfähigkeit bei weitem nicht an die des Schwelkokses heranreicht. -

Dichte Ausführung des Herdes unterhalb der Feuerung

Eingangs wurde schon auf die Notwendigkeit hingewiesen, die Feuerstätten für Schwelkoks so dicht wie nur möglich auszuführen. Hierzu seien auch noch einige konstruktive Anregungen gegeben. An der Spitze steht die dichte Ausführung des Aschenraumes. Sofern die Herde aus Stahlblech hergestellt werden, sind die Wände des Aschenraumes an allen Stoßstellen zu verschweißen oder auf andere Weise gasdicht zu verbinden. Der Rahmen der Aschentür ist unter Einlage eines geeigneten Dichtungsmittels (Asbeststreifen oder Kesselkitt) dicht auf der Vorderwand aufzuschrauben. Bei Verwendung von Kitt ist an der Auflegefläche eine Nute vorzusehen, die ein sicheres Haften des Kittes verbürgt, s. in Abb. 8. Von gleicher Wichtigkeit ist ferner das dichte Schließen der Aschentür. Einschiebbare Aschenkästen mit Vorderwand, die die Tür ersetzen soll, sind abzulehnen, weil sie keinen dichten Verschluß ermöglichen. Die Dichtflächen zwischen Tür und Rahmen können, wenn sie aus Gußeisen bestehen, geschliffen sein

oder als Falzdichtung hergestellt werden, vgl. b, c, e in Abb. 8. Im ersten Falle ist darauf zu achten, da die Tür satt aufliegt und auch bei kräftigem Anspannen des Verschlusses kein Abheben der Tür auf der Scharnierseite eintritt. Zweckmäßigerweise beugt man demselben bei der Fertigung vor, indem man dem Verschluß eine Vorspannung gibt. Wenn die fertig geschliffenen Teile (Tür und Rahmen) auf die Vorrichtung zum Bohren der Knaggen gespannt werden, legt man ein etwa 1 mm starkes Blech auf der Seite des Verschlusses zwischen Tür und Rahmen.

Bei Falzdichtung ist Vorsorge zu treffen, daß das Dichtungsmittel fest im Falz haftet und nicht herausfällt. Zweckmäßig ist es daher, wenn der Falz als Schwalbenschwanz, c in Abb. 8, oder als Kreisabschnitt mit innerhalb des Falzes liegendem Kreismittelpunkt ausgebildet wird, d in Abb. 8. Bei Herstellung in Gußeisen erfordert der zweite Vorschlag, der wegen der allseitig gleichen Dicke des Dichtungsmaterials die beste Gewähr für dauerhafte Dichtung gibt, das Einlegen eines Kernes, während die Form mit Schwalbenschwanz ohne weiteres auf einer Durchzugformmaschine hergestellt werden kann. Hingegen ist eine Mittelart beider Falzarten leicht auszuführen, wenn nach einem Vorschlag des Verfassers die Türen aus Stahlblech gefertigt werden, e in Abb. 8. Welcher Werkstoff künftig für die Herstellung bevorzugt wird, dürfte u.a. von der Rohstofflage und der verfügbarenFertigungswerkstätten abhängen.

Kesselkitt, der allgemein bei Falztüren von Kachelöfen als Dichtungsmittel verwendet wird, ist wegen seiner Sprödigkeit nach dem Erhärten wenig geeignet. Sehr gut bewährte sich hingegen feine Stahlwolle bei Versuchen des Verfassers, die als Strick zusammengedreht wurde. Erwähnt sei auch, daß einer namhaften Ofenfabrik eine Dichtung geschützt ist, die aus Aluminiumwolle mit einem

keramischen Füllmaterial besteht.

Ausführung und Bemessung des Luftregelorganes

Das Regelorgan für die Verbrennungsluft wird neuerdings vielfach in der Aschentür untergebracht. Eine ansprechende Lösung, bei der die Rosette unter einer Blechhaube verdeckt angeordnet ist, wird bei f in Abb. 8 gezeigt. Ebenso ist es aber auch möglich, das Luftregelorgan an anderer Stelle anzubringen, z.B. zwischen Aschen- und Feuertür oder, dem Blickfeld entzogen, an der Seiten- oder Hinterwand des Ascherraumes. Entscheidend ist nur, daß die eingangs aufgestellten Forderungen hinsichtlich seines Regelbereiches und seines dichten Abschlusses gewahrt bleiben.

Bei voller Öffnung soll die freie Öffnung des Regelorgans so groß sein, daß sie auch bei schwächstem Schornsteinzug während des ersten Anheizens ausreicht, die erforderliche Luftmenge ohne nennenswerten Druckverlust einströmen zu lassen. Eingehende Versuche auf den Prüfständen und in der Praxis haben ergeben, daß die größte Öffnung bei Herden mindestens 20 % der freien Rostfläche betragen muß. Gestaffelt nach den früher angegebenen Herdgrößen müssen die Mindestquerschnitte demnach betragen:

bei Herdgröße I bis IV mindestens 28 cm^2
" " V " 35 cm^2.

Selbstverständlich ist, daß der freie Durchlaß des Reglers an keiner Stelle vor oder hinter der Regelöffnung eingeengt oder die Luftströmung durch scharfe Umlenkungen behindert wird.

Dichte Ausführung des Herdes oberhalb der Feuerung

Was über die dichte Ausführung der Aschentür gesagt wur-

ab, gilt auch für die Feuertür. Erschwerend kommt hier hinzu, daß sie der Strahlung des Glutbettes ausgesetzt ist und sich daher bei ungünstiger Abschirmung leicht verwirft. Am besten bewährt hat sich hier eine gußeiserne, vor die Innenseite der Tür geschraubte Schutzplatte. Diese muß jedoch die ganze Türöffnung überdecken, damit gerade die Dichtflächen zwischen Tür und Rahmen gegen zu hohe Erwärmung geschützt werden, g in Abb. 8.

Die Abdeckplatte des Herdes wird in der Regel aus Gußeisen hergestellt, wobei meistens die eigentliche Kochfläche, die aus einem oder mehreren "Einlegern" besteht, in einen mit dem Herdkörper fest verbundenen Rahmen eingelegt ist. Möglichkeiten für Undichtheiten bestehen einmal an der Dichtfläche zwischen den Herdwänden und dem Rahmen, die noch durch die verschiedenartige Erwärmung beider Teile vergrößert werden. Es ist daher vorteilhaft, wenn die Abdichtung durch Einlegen eines Asbeststreifens, wie bei b in Abb. 9 b skizziert, elastisch gestaltet wird. Ferner befinden sich Falschluftquellen an den Auflageflächen der Einleger. Die einfache Auflage (vgl. a in Abb. 9) genügt nicht, da die unbearbeiteten Gußflächen nur an einigen Stellen aufliegen und Spalten frei bleiben, deren Querschnitt bei der beträchtlichen Länge aller Auflageflächen eine ins Gewicht fallende Falschluftmenge eintreten lassen. Nachteilig wirkt sich die Undichtigkeit an diesen Stellen auf die Übertragung der Wärme von den Rauchgasen an die Kochplatte aus, weil die Falschluft sich als Schleier zwischen die Platte und die heißen Gase legt. Ferner wird durch Mischung der Falschluft mit den Rauchgasen auch deren Temperatur herabgesetzt, so daß auch die ausreichende Erwärmung des

nachgeschalteten Bratofens in Frage gestellt ist. Es ist darum notwendig, die Einleger am Rande mit Dichtleisten zu versehen, die in einen Falz des Herdrahmens greifen, c in Abb. 9. Ebenso sind die Einleger mit ineinander greifenden Falzen auszuführen, wie es schon beim Bratofenboden vorgeschlagen wurde. Bei d in Abb. 9 ist die bei neueren Qualitätsherden angewandte Ausführung dargestellt. Sie hat sich gut bewährt, weist jedoch einen Mangel auf: Durch die scharf vorspringenden Rippen an der Unterseite der Platte wird der Rauchgasstrom von der Platte abgelöst und es bilden sich tote Wirbelräume aus, die den Wärmeaustausch zwischen Rauchgasen und Platte beeinträchtigen. Günstig ist ein dem Strömungsverlauf angepaßter allmählicher Übergang von den Rippen zur Plattenfläche, e in Abb. 9. Diese vom Verfasser auf Grund seiner Beobachtungen bei der Verfeuerung gasreicher Brennstoffe gegebene Anregung ist auch für den Schwelkoks von Wichtigkeit, weil sich die Verbrennung bei diesem wegen seiner leichten Vergasbarkeit auch noch oberhalb des Brennstoffbettes fortsetzt. Infolgedessen tritt beim Wärmeaustausch die durch Strahlung übertragene Wärmemenge zurück zugunsten der Wärmeleitung von den hochtemperierten Verbrennungsgasen an die Heizflächen übergehenden Menge.

In gleicher Weise ist eine Abdichtung zwischen Kochlochdeckel und Einleger erforderlich, f in Abb. 9. Ringsätze sind, weil sie keine ebene Auflage für die Töpfe ergeben und außerdem sehr undicht sind, zu verwerfen. Zur Verbesserung der Wärmeaufnahme kann der Kochdeckel auf der Unterseite mit angegossenen Zapfen (g in Abb. 9) versehen werden. Lange Rippen, wie vielfach ausgeführt, sind weniger vorteilhaft, weil sie die Rauchgasströmung behindern und unerwünschte tote Räume unter der Kochplatte schaffen...

Für das einwandfreie Arbeiten des Herdes, insbesondere die gute Erwärmung des Bratofens, ist endlich noch das dichte Schließen der Anheizklappe von Wichtigkeit. Sie ist notwendig, um bei schwachem Schornsteinzug überhaupt das Anheizen zu ermöglichen. Die Rauchgase werden bei geöffneter Klappe sofort in den Schornstein geleitet. Ist dann der Auftrieb groß genug, wird die Anheizklappe geschlossen, so daß die Rauchgase den Bratofen umspülen müssen. Es ist nun die Forderung zu stellen, daß einmal die Klappe im geschlossenen Zustande verbleibt und nicht von selbst aufgeht, und ferner, daß sie sich auch bei starker Erwärmung nicht verzieht. Gegen das Selbstöffnen wird zweckmäßigerweise eine Knagge oder ein Arretierstift am Griff vorgesehen, a in Abb. 10, der die Klappe in den beiden Endstellungen festhält. Um ein Verziehen zu verhindern, ist es zweckmäßig, die Klappe mit Rippen zu versehen. Diese können, wie bei b in Abb. 10 gezeigt, gleichzeitig zur Verbesserung der Abdichtung benutzt werden. Eine selbstverständliche Forderung ist, daß das ordnungsgemäße Schließen der Klappe nicht durch abgelagerte Flugasche behindert wird. Die Klappe darf daher nicht auf der Bratofendecke schleifen, sondern muß einige Millimeter Spiel haben.

Maßnahmen zur Erzielung der Stubenreinheit

In einem früheren Abschnitt wurde schon auf die Bedeutung hingewiesen, die die schmutzfreie Bedienung des Herdes für die Hausfrau hat. Besonders wichtig ist dies dann, wenn ein aschereicherer Schwelkoks verwendet wird. Allgemein gilt ja, daß der Schwelkoks bei vernünftiger Wartung kaum zur Schlackenbildung neigt. Das ist für die Hausfrau zweifellos angenehm und arbeitsparend. Andererseits führt der staubförmige Anfall der Asche leicht dazu, daß beim Öffnen der Türen und dem Entfernen der Asche die Umgebung verschmutzt wird. Diesem ist durch geeignete konstruktive Maßnahmen vorzubeugen.

Beim Öffnen der Feuertür fällt häufig unverbrannter Brennstoff oder Asche heraus. Dieses kann, wenn auch nicht ganz beseitigt, so doch erheblich dadurch eingeschränkt werden, daß der Rost mehr in die Mitte des Herdes gelegt wird, a in Abb. 11, und der davor angebrachte Schamottestein, die "Rostvorlage", zum Rost hin geneigt eingesetzt wird, b in Abb. 11. Durch den bei schnellem Öffnen der Feuertür entstehenden Sog wird ferner Asche und Grus mitgerissen. Wenn die Tür zu schwer aufgeht oder der Griff unbequem zu fassen ist oder zu heiß wird, wird die Hausfrau verleitet, die Tür mit einem Ruck zu öffnen. Es ist daher Vorsorge zu treffen, daß die Tür nicht klemmt und leicht gangbar bleibt. In dieser Hinsicht sind kurze Griffe mit Vorreiber ungeeignet, die unmittelbar auf der Tür angebracht sind; ebenso ungeeignet sind auch einige neuere Versuchskonstruktionen, bei denen ein Selbstschließen der Tür beim bloßen Zuschlagen durch Federstahlstifte oder dgl., die hinter eine an der Tür angebrachte Kragge fassen, herbeigeführt werden soll. Am besten bewährt haben sich bisher Knebelverschlüsse mit langem, bequem anzufassendem Griff. Eine gute Lösung dieser Art zeigt h in Abb.8.

Die Bedienung wird wesentlich vereinfacht, wenn der Rost als Rüttel- oder Schieberost ausgebildet wird. Bei bakkenden oder leicht zur Schlackenbildung neigenden Brennstoffen bleibt der Erfolg des Rüttelns oft zweifelhaft, weil trotz Bewegung des Rostes - sofern er sich überhaupt noch bewegen läßt - das Brennstoffbett in Ruhe bleibt. Bei Verfeuerung von Schwelkoks treten diese Unannehmlichkeiten nicht auf. Es genügen einige Bewegungen, um die Asche vom Rost zu entfernen. Ein besonderer Vorteil des Rüttelrostes besteht bei Verwendung von Schwelkoks auch darin, daß er in geradezu idealer Weise eine schonende Bewegung in das ganze Brennstoffbett bringt. Dadurch wird die Aschenhülle, die sich mit zunehmendem Abbrand um die Koksstückchen bildet, abgestreift, und das Brennstoffbett

eingeebnet. Die Feuerung läßt sich dann schnell wieder auf volle Leistung bringen und die Verbrennung verläuft wegen der gleichmäßigen Rostbedeckung mit niedrigem Luftüberschuß. Am einfachsten und für den Schwelkoks am günstigsten ist beim Herd der Schieberost, Abb. 11 c. Er muß nur gut in einem allseitig übergreifenden Rahmen, der das Dazwischenfallen von Koksstückchen und damit das Klemmen verhindert, geführt sein. Außerdem entsteht bei Durchführung der Zugstange durch die Herdwandung keine schädliche Öffnung, da die Bohrung stets von der Zugstange ausgefüllt ist. Die einzelnen Stäbe des Tafelrostes können entweder glatt oder leicht gewellt sein, wodurch die Bewegung des Glutbettes verstärkt wird, d in Abb. 11 d.

Unter dem Rost sollen Leitbleche angeordnet werden, die alle durchfallende Asche in den Aschenkasten leiten, e in Abb. 11 e. Wenn der Aschenfall nicht zu hoch ist, können sie so lang gemacht werden, daß zwischen ihnen gleichzeitig der Aschenkasten geführt wird. Anderenfalls sind am Boden des Aschenraumes Führungsschienen anzubringen, zwischen denen der Aschenkasten eingeschoben wird.

Der Aschenkasten muß bei Verwendung eines aschereichen Braunkohlenschwelkokses mindestens die Asche eines Vollbetriebstages fassen können. Entsprechend der Leistung der vorher angeführten Herdgrößen und unter Berücksichtigung der Menge und des spezifischen Gewichtes der Asche muß sein nutzbarer Inhalt daher betragen:

bei Herdgröße		I	3 l
"	"	II	4 l
"	"	III	4 l
"	"	IV	4 l
"	"	V	5 l.

Die Vorderwand des Aschenkastens ist abzuschrägen, damit die Asche beim Entleeren ohne Staubentwicklung herausgleiten kann.

b. Herd mit geschlossenem Kochraum (Schrankherd)

Im Westen Deutschlands gab es schon immer eiserne Öfen mit eingebautem Kochraum, der sog. "Kochkachel", im Osten Deutschlands und den angrenzenden Ländern war es üblich, die ortsfest gemauerten Heizöfen mit großem Kochraum, der vom Flur oder der Küche aus zugänglich war, zu versehen. Diese Konstruktion hat in den letzten Jahrzehnten für Spezialzwecke wieder Bedeutung gewonnen.

Grundsätzliches zum Grudeherd

Um den Grudekoks, der bei der Schwelung von Rohbraunkohle oder wenig standfester Briketts kleinkörnig anfällt, im Hausbrand absetzen zu können, mußte man erst geeignete Feuerstätten entwickeln, in denen er wirtschaftlich verwendet werden konnte. Da der Grudekoks wegen seiner dichten Lagerung in der Feuerung bei dem geringen Zug, den die Haushaltsschornsteine liefern, nicht flott brennt, sondern nur langsam glimmt und daher in der Zeiteinheit nur eine geringe Wärmemenge entwickelt, erschien für ihn ein Herd mit geschlossenem Kochraum geeignet, weil bei diesem die Wärmeabstrahlung nach außen nur gering ist. So entstand der allbekannte "Grudeherd". Auf seine Einrichtung im einzelnen einzugehen, dürfte sich im Rahmen dieser Arbeit erübrigen, weil seine Entwicklung als abgeschlossen gelten kann. Außerdem ist seine Verbreitung auf das Erzeugungsgebiet des Grudekokses im mitteldeutschen Raume beschränkt. Der Grudekoks dürfte in Zukunft noch an Bedeutung verlieren, da man immer mehr dazu übergeht, besonders aufbereitete standfeste Braunkohlenbriketts zu verschwelen, die einen stückfesten Schwelkoks liefern.

Allgemeine Vorteile des Schrankherdes

An einer Tatsache darf man jedoch nicht achtlos vorbeigehen. Hausfrauen, die sich an das Kochen im Grudeherd einmal gewöhnt haben, mögen ihn nie mehr missen. Die Möglichkeit, Speisen, die eine längere Kochdauer erfordern, ohne Beaufsichtigung kochen zu lassen, ferner ständig Warmwasser zur Verfügung zu haben, bedeutet einen Vorteil, den kein anderer Herd in diesem Maße bietet. Es liegt daher nahe, auch für den stückigen Schwelkoks aus Stein- oder Braunkohle diese Herdkonstruktion anzuwenden, da er die Annehmlichkeit des langsamen Dauerbrandes in noch höherem Maße besitzt, darüber hinaus aber noch eine beim Grudekoks nicht erreichbare Steigerung der Wärmeleistung ermöglicht.

Auf einen anderen Umstand, der zwar nicht in unmittelbarem Zusammenhange mit dem Thema steht, sei doch kurz hingewiesen. Als man zu der Zeit der schweren Bombenangriffe, durch die viel Wohnraum vernichtet wurde, an den Bau von Behelfsheimen ging, trat auch die Frage ihrer zweckmäßigen Beheizung, die möglichst vom Kochherd aus erfolgen sollte, auf. Der übliche eiserne Herd mit offener Kochplatte befriedigte wenig, weil er kaum Wärme speichert, und daher das Heim während der Betriebspausen des Herdes zu stark auskühlte. Außerdem war das Kochen auf offener Platte auch aus hygienischen Gründen zu beanstanden, da die Kochdünste und der Brasen z.B. beim Wäschekochen in den einzigen auch für den Tagesaufenthalt und das Schlafen verfügbaren Raum traten und ihn unerträglich feucht machten. Dieser Umstand ist auch für die zukünftigen Planungen, bei denen sicher die Wohnküche im Vordergrund stehen wird, wichtig.

Material und Ausführung des Herdmantels

Der für Grudekoks konstruierte Herd ist einschließlich der Feuerung aus dünnem Stahlblech gebaut. In der Praxis hat sich diese Ausführung auch durchaus bewährt, da die thermische Beanspruchung wegen des nur glimmenden Abbrandes des Grudekokses nur gering ist. Vorsorge mußte andererseits dafür getroffen werden, daß die Blechwände usw. im Bereiche niedrigerer Temperaturen durch den Angriff schwefliger Säure nicht zu rasch zerfressen wurden. Deshalb wurden üblicherweise die Rauchrohre usw. verbleit.

Andere Anforderungen stellt demgegenüber der stückfeste Schwelkoks, gleichgültig ob er aus Stein- oder Braunkohle erschwelt ist. Auf seine Neigung zum "Durchgehen", d.h. die sich von selbst steigernde Intensität der Verbrennung, die die der Kohlen teilweise übertrifft und die mit fallendem Aschegehalt wächst, wurde früher schon hingewiesen. Dauerhafte Ausmauerung der Feuerung mit Schamotte und bleibende Dichtheit (vor allem unterhalb der Feuerung) sind hier in erhöhtem Maße erforderlich.

Eine vielversprechende Konstruktion, die allerdings wegen der damaligen Material- und Herstellungsschwierigkeiten noch nicht bis zur Fertigungsreife gediehen war, wurde im vergangenen Jahr auf unserem Prüfstand untersucht und gemeinsam mit dem Hersteller weiter entwickelt, Abb. 12. Neben Braunkohlenbriketts wurde bei diesem Versuchen auch Braunkohlen-Stückkoks verwendet. In der Materialfrage wurden insbesondere von dem Ofenfabrikanten Briel, Reutlingen, teilweise neue Wege beschritten, auf die hier bei Erörterung der Konstruktionseinzelheiten näher eingegangen werden soll.

Bei dem damaligen Mangel an Feinblech stellte sich Briel die Aufgabe, sowohl für den Mantel des Kochraumes als

auch für die Außenwände keramisches Material in möglichst dünner Wandstärke zu verwenden, um einen guten Wärmedurchgang zu erzielen. Es gelang ihm, Platten von nur 10 mm Stärke, die den thermischen Dauerbeanspruchungen durchaus gewachsen waren, auf kaltem Wege herzustellen. Die Platten bestanden aus zerkleinerter Schamotte mit Zement als Bindemittel und waren mit einem dünnen Drahtgewebe armiert. In 10 mm Stärke wurden die Platten für den Mantel des Kochraumes benutzt, a in Abb. 12, während die Außenwände aus gleichem Material 3 bis 5 mm stark waren, um eine größere Wärmespeicherung zu erhalten, b in Abb. 12. Die Außenflächen der Wände waren mit einer in verschiedenen Farben herzustellenden Kaltglasur versehen, so daß sich jeder Brennprozeß erübrigte.

Trotz der günstigen Versuchsergebnisse wird man in normalen Zeiten die Wände des Kochraumes der billigeren Herstellung wegen aus Stahlblech anfertigen. Allerdings müssen sie aus hygienischen und Haltbarkeitsgründen durch einen Überzug gegen Korrosion geschützt werden. Am besten ist es, die Blechwände auf beiden Seiten mit einem schlag- und feuerfesten Emailleüberzug zu versehen. Für die Außenwände wird sich jedoch des gefälligeren Aussehens und der größeren Wärmespeicherung wegen empfehlen, das keramische Material beizubehalten.

Rost und Feuerung

sind der verlangten Gesamtleistung des Herdes anzupassen. Die Rostwärmebelastung ist wie bei den Herden mit offener Kochplatte mit etwa 250 000 kcal/m^{2}h anzusetzen. Dank des höheren Gesamtwirkungsgrades gegenüber den Herden mit offener Kochplatte - im Durchschnitt wurde er zu über 80 % ermittelt - beträgt die Gesamtleistung bei einer Rostgröße von 15 x 20 = 300 cm^2 und der angegebenen Rostwärmebelastung mindestens 6000 kcal/h. Die Feuerraum-

höhe, d.h. der Abstand zwischen Rost und Boden des Kochraumes, ist im vorliegenden Fall auf 14 cm festzulegen. Entsprechend sind bei größeren Herdtypen die vorhin angegebenen Maße unter Berücksichtigung der günstigeren Ausnutzung zu übernehmen. Allerdings ist es kaum erforderlich, dem Schrankherd in wesentlich größeren Abmessungen herzustellen, da die Leistung des untersuchten Herdes schon an die der größeren Haushaltsherde heranreicht.

Zugführung und Zugquerschnitte

Die Zugführung richtet sich danach, ob sich die Feuerung in der Mitte der Vorderfront des Herdes (c in Abb. 12) befindet oder ob sie einseitig mit daneben angebrachtem Wasserkessel eingebaut wird, Abb. 13. Die erste Lösung ist vorzuziehen, weil sich der Zug einfacher führen und der Kochraum sich gleichmäßiger erwärmen läßt. Die Zughöhe unterhalb der Bodenplatte soll mindestens 6 cm betragen, damit auch bei Ablagerung von Flugasche ein noch ausreichender Querschnitt verbleibt. Dieser ist auch deshalb notwendig, weil der Ausbrand der Gase sich bis in die waagerechten Züge erstreckt. Hingegen genügt für die beiden aufsteigenden Züge eine Breite von etwa 3 cm, da jeder Zug nur die Hälfte der Rauchgasmenge aufzunehmen hat und außerdem der gesamte Strömungswiderstand des Herdes, da er nur waagerechte und aufsteigende Züge hat, sehr gering ist. Die Deckenzüge sind wieder höher zu wählen. Mit Rücksicht auf die Flugaschenablagerung sollen auch sie mindestens 6 cm hoch sein. Eine zu starke Absenkung der Geschwindigkeit wird dadurch vermieden, daß Leitzungen beiderseits des Rauchabzuges eingebaut werden. Dadurch werden einmal die Zugquerschnitte verkleinert, zum anderen werden die Rauchgase, nachdem sie die Breitseiten des Kochraumes auf der ganzen Fläche umspült haben, an die Vorderseite gedrängt. Dadurch wird hier eine stärkere Beheizung erwirkt, so daß trotz der stärkeren

Abkühlung an der Türseite die Erwärmung des Kochraumes ausgeglichen ist. Wärmetechnisch von Vorteil ist, wenn in die Decke des Schrankherdes ein Wasserkessel eingebaut wird, der eine weitere Ausnutzung der Rauchgaswärme gestattet. Er kann fast die ganze Deckenfläche einnehmen, so daß sein Inhalt bequem den Warmwasserbedarf des Haushaltes decken kann. Um die Entnahme des warmen Wassers für die Hausfrau bequem zu machen, kann ein unten mit Entleerungshahn vorgesehenes Rohr in einem Seitenzug bis in Handhöhe heruntergeführt werden. Während bei dem Schrankherd ohne Wasserkessel der Rauchrohranschluß zweckmäßig in die Decke eingelegt wird, empfiehlt es sich hier, ihn gemäß Abb. 14 an der Rückwand anzuordnen.

Ausführung des Kochraumes

Für die Hausfrau ist es angenehm, wenn sie statt zweier Kochräume, wie sie häufig bei größeren Grudeherden anzutreffen sind, nur einen, der dafür entsprechend hoch ist, zu bedienen hat. Sie kann dann die Speisen zubereiten und sie beobachten, ohne die Töpfe aus dem Herd herausnehmen zu brauchen; dann können auch größere Töpfe, die u.a. in Haushalten mit Kleinkindern zum Wäschekochen benötigt werden, eingesetzt werden. Bedenken, daß die Erwärmung bei größerer Höhe nicht ausreichen würde (wie z.B. beim Bratofen des Herdes mit offener Platte), bestehen hier nicht, denn der Boden des Kochraumes wird unmittelbar von der Feuerung beheizt und der Temperaturabfall der Rauchgase ist in den aufsteigenden Zügen nicht so stark wie in den fallenden Zügen bei Herden mit offener Kochplatte. Ferner ist für das gute Geraten des Koch- und Backgutes entscheidend, daß die Unterhitze intensiver als die Oberhitze ist. Diese kann dadurch geregelt werden, daß die Töpfe bzw. Backformen auf einen Rost gesetzt werden, der auf seitlich an den Wänden des Koch-

raumes angebrachten Leisten eingeschoben wird. Außerdem ist es hierbei möglich, in mehreren Etagen zu kochen, ähnlich wie beim Turmkochen mit Gas.

Die Tür des Kochraumes kann entweder als Falltür oder auch zweiflüglig nach beiden Seiten aufschlagend ausgebildet werden. Im ersten Fall ist dafür zu sorgen, daß sie in waagerechter Lage gehalten wird, um darauf die Töpfe verschieben zu können. Als zusätzliche Abstellfläche ist sie für die Hausfrau recht erwünscht. Sie behindert allerdings, wenn der Kochraum höher ist, die Bedienung, weil sie dann zu weit auslädet.

Anzustreben ist natürlich, daß die Tür möglichst dicht im Rahmen liegt. Dies ist jedoch, zumal die Türen entweder selbstschließend ausgebildet werden oder nur einen leichten Knebelverschluß haben, wegen des geringen Anpreßdrukkes kaum zu erreichen. Es ist daher erforderlich, den Kochraum gegen die Heizzüge gut abzudichten. Ein Vorschlag für die Ausführung ist in Abb. 15 skizziert. Der Boden wird wegen der hohen Wärmebeanspruchung aus Gußeisen hergestellt. Er besteht aus einem aus vier Gußleisten zusammengeschraubten Rahmen, in den ein zweiteiliger "Einleger" mit Kochloch eingesetzt wird. Einleger und Kochlochdeckel haben an der Unterseite umlaufende Leisten, die in einen Falz des Rahmens bzw. des Kochloches eingreifen und mit feinem Sand abgedichtet werden. An dem Rahmen sind die aus emailliertem Blech bestehenden Seitenwände angeschraubt. Mit Rücksicht auf die Raumausnutzung im Emaillierofen werden Decke/ und Seitenwände getrennt hergestellt und dann zusammengeschraubt. Der Kochraumkasten wird dann mit Kesselkitt an den Türrahmen und die Hinterwand des Herdes angeschraubt.

Um den Wrasen aus dem Kochraum abzusaugen, pflegt man in der Ofendecke oft eine Rosette anzubringen. So zweckmäßig

sie an sich ist, um bei starker Dampfbildung das Austreten von Dampf aus der Tür zu vermeiden, so kann sie sich doch, wenn sie aus Unachtsamkeit offen gelassen wird, nachteilig auswirken, weil dauernd kalte Luft durch sie eingesaugt wird. Auf die Verbrennung hat die Falschluft zwar keinen schädlichen Einfluß, da sie erst in den letzten Heizzug eintritt; sie beeinträchtigt jedoch in erheblichem Maße die Gleichmäßigkeit der Temperatur im Kochraum.

Weitere Konstruktionsteile

Für die übrigen Konstruktionsteile (dichte Ausführung der Türen, Ausbildung des Rostes als Rüttelrost, Größe des Aschenkastens, Anbringen von Ascheleitblechen unter dem Rost) gilt das Gleiche, was darüber beim Herd mit offener Kochplatte gesagt wurde.

Die Vorteile, die der Schrankherd dem Herd mit offener Platte gegenüber gerade bei Verwendung von Schwelkoks aufweist, lassen es wert erscheinen, dieser Konstruktion in Zukunft größte Beachtung entgegenzubringen.

II. Der Badeofen

a. Eignung des mit Schwelkoks befeuerten Badeofens für die ständige Warmwasserbereitung

Die Badeöfen älterer Bauart, die gewöhnlich aus einem Feuerungsuntersatz und darauf gesetztem doppelwandigen Zylinder mit Wasserfüllung bestehen, sind wegen ihrer groben Undichtheiten nur für kurzzeitigen Vollbetrieb, d.h. für die Bereitung eines oder mehrerer dicht aufeinander folgender Bäder geeignet. Hingegen ist es bei ihnen nur durch unwirtschaftlich hohen Brennstoffverbrauch

und laufenden Bedienungsaufwand möglich, das Wasser über längere Zeit auf einer annehmbaren Temperatur zu halten, die auch für andere Haushaltszwecke, z.B. zum Geschirrspülen usw. ausreicht. Im Hinblick auf ihren ursprünglichen Zweck verzichtete man auf jede Regelmöglichkeit und begnügte sich damit, den Aschenkasten, dessen Vorderwand gleichzeitig als Deckel dient, je nach der Zugstärke mehr oder weniger weit herauszuziehen.

Die Möglichkeit, den Badeofen auch als Warmwasserbereiter zu benutzen, d.h. ihn dauernd zu beheizen, wurde erst verhältnismäßig spät erwogen. Anstoß dazu gab einmal die Tatsache, daß die ständige Lieferung von Warmwasser der Hausfrau und auch allen anderen Mitgliedern des Haushaltes mehr Erleichterung in der Arbeit und Annehmlichkeit bietet als etwa die zentrale Beheizung der Wohnung. Das ist auch der Grund, daß die Gas- und Stromgeräte trotz der verhältnismäßig hohen Kosten der Energie auch in den minderbemittelten Volkskreisen so rasch und in so hohem Maße Eingang fanden. Andererseits führte die technische Verbesserung an den anderen Feuerstätten dazu, die dort gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Badeöfen zu übertragen. Ausschlaggebend war hierbei, daß die Herstellerfirmen von Öfen und Herden, den Anregungen der Braunkohlenindustrie folgend, die Konstruktion ihrer Geräte vornehmlich den Eigenschaften der Braunkohlenbriketts anpaßten. Diese ermöglichen es erst, dank ihrer guten Dauerbrandfähigkeit, den Badeofen ständig betriebsbereit zu halten; nach Aufheizen des Wassers wird durch den allmählichen Abbrand der Glut gerade so viel Wärme erzeugt, wie das Wasser durch Leitung und Strahlung des Außenmantels an die Umgebung verliert. Gegenüber Braunkohlenbriketts bietet aber die Verwendung von Schwelkoks noch weit günstigere Aussichten. Bei den bitumenhaltigen Brennstoffen ist die Gefahr der Verteerung und Verkrustung der Heizflächen recht groß, weil die Flammen unmittelbar an die wassergekühlten Flächen

schlagen und dadurch ihr restloser Ausbrand beeinträchtigt wird. Bei der Konstruktion für diese Brennstoffe muß man sich daher, oft unter Verzicht auf die Schaffung günstiger Verhältnisse für die Wärmeübertragung, gewisse Beschränkungen auferlegen, um geringe Ablagerungsflächen für Flugasche und Teer zu erhalten und ihre leichte Reinigung zu ermöglichen. Diese Bedenken fallen beim Schwelkoks fort, so daß die wärmetechnischen Maßnahmen mehr in den Vordergrund treten können. Andererseits ist beim Schwelkoks, der je nach seiner Herkunft einen mehr oder minder hohen Schwefelgehalt hat, der Materialfrage erhöhte Bedeutung zu schenken. Korrosionsempfindliche Metalle dürfen, weil der Taupunkt der Rauchgase, besonders im Schwachlastbetrieb, häufig unterschritten wird, nicht verwendet werden oder müssen mit einem geeigneten Überzug versehen werden. Gut bewährt hat sich eine säurefeste Emaillierung.

b. Bauarten der Badeöfen und Kleinwarmwasserbereiter

Bei den Badeöfen und Kleinwarmwasserbereitern sind zwei Typen zu unterscheiden: Zunächst die bereits erwähnte mit Feuerungsuntersatz und darauf gesetztem doppelwandigen Wasserzylinder, Abb. 16 a, dann eine andere, bei der die Feuerung in dem Wasserbehälter eingebaut ist, so daß er allseitig von Wasser umspült wird, Abb. 16 b. Wenn man den Gesamtwirkungsgrad, d.h. die zur Wassererwärmung und Raumheizung gesamt nutzbar gemachte Wärme betrachtet, sind beide Typen durchaus gleichwertig. Der Anteil der Wassererwärmung ist jedoch bei dem Warmwasserbereiter mit eingebauter Feuerung größer, und er kann noch gesteigert werden, wenn der Mantel isoliert wird. Die Wahl des Typs hängt von den im Einzelfall vorliegenden Ansprüchen ab, z.B. ob ein Badezimmer, das hohe Wärmeverluste hat, mitbeheizt werden soll, oder ob der Warmwas-

serbereiter in einen Nebenraum, auf dessen Beheizung kein Wert gelegt wird, aufgestellt werden soll.

Zu der Konstruktion beider Typen, soweit sie für die Verwendung von Schwelkoks Interesse haben, seien im folgenden einige Anregungen gegeben.

c. Bauliche Einzelheiten

Rostgröße und Rostausführung

Da der Strömungswiderstand des ganzen Badeofens außerordentlich niedrig ist, kann unter normalen Zugverhältnissen die Rostwärmebelastung wesentlich höher als bei den Herden mit etwa 350 000 bis 400 000 kcal/m^{2}h angesetzt werden. Die totale Rostgröße R ist dann aus der Forderung, daß bei einem Wirkungsgrad von etwa 50 % ein Vollbad von 120 l mit einer Auslauftemperatur von 40° in 40 min hergestellt werden soll, zu ermitteln:

$$R = \frac{120\,(40 - 10)\,.60}{400\,000\,.0{,}5\,.40} = 0{,}027\ m^2.$$

Dies entspricht einer Rostfläche von etwa 14 x 20 cm^2. Die der Berechnung zugrunde gelegte Rostwärmebelastung wird im praktischen Betrieb nur beim ersten Hochheizen und bei der Badbereitung verlangt. Die Wasserentnahme für andere Zwecke macht stets nur einen Bruchteil der für ein Bad benötigten Wassermenge aus, so daß auch die Rostbelastung dann entsprechend geringer ist.

Wenn der Badeofen ständig in Betrieb gehalten wird, empfiehlt es sich sehr, einen Rüttelrost vorzusehen. Bei Öfen mit getrenntem Feuerungsuntersatz wird dieser zweckmäßig als Ziehrost ausgebildet, da unterhalb der Ausmauerung genügend Raum dafür vorhanden ist. Bei eingebautem Feuerraum ist wegen der beschränkten Platzverhältnisse jedoch ein Rüttelrost angebrachter.

Dichtheit der Ausführung

Besonderes Augenmerk ist wieder mit Rücksicht auf den Dauerbrand der Dichtheit der Feuerung zu schenken. Die Feuer- und Fülltür wird gern als Falltür ausgebildet, weil sie für die Bedienung angenehm ist. Besonders gilt das für den Fall, wenn der Ofen auf dem Fußboden steht. In letzter Zeit ist man aus Gründen der Raumeinsparung mehr und mehr dazu übergegangen, den Ofen auf Konsolen an der Wand zu befestigen. Auch hierbei hat man die Falltür der angenehmeren Bedienung wegen beibehalten. Es muß aber unbedingt verlangt werden, daß ihre Ausführung für die Dauer einen dichten Verschluß verbürgt.

Zunächst ist erforderlich, daß die Dichtflächen aufgeschliffen werden. Es ist dringend zu empfehlen, sich nicht mit einem losen Zufallen der Tür vermöge ihrer Schwerkraft zu begnügen, sondern den Bedienungsgriff als Knebelverschluß auszubilden, a in Abb. 17. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Tür der Strahlung der Glut stark ausgesetzt ist. Deshalb muß sie unbedingt durch eine gußeiserne Hantel, wie bei b in Abb. 17 gezeigt ist, geschützt werden. Bei der Bedienung macht sich immer störend bemerkbar, wenn beim Einfüllen von Brennstoff kleine Koksstückchen oder Grus zwischen die Dichtflächen und auf die Innenseite der Klapptür fallen. Dadurch wird das einwandfreie Schließen der Tür verhindert; außerdem wird dadurch die angestrebte Stubenreinheit beeinträchtigt. Diesem Mangel kann man dadurch abhelfen, daß nach Art der Abb. 17 bei c eine Klappe drehbar an der Schutzplatte b befestigt wird, die beim Schließen auf der Türzarge entlang gleitet und den darauf liegenden Grus in die Feuerung befördert.

Die Dichtflächen der Aschentür müssen ebenfalls aufgeschliffen sein oder können auch mit Falzen, wie beim

Küchenherd beschrieben, versehen sein.

Bei den Badeöfen mit besonderem Feuerungsuntersatz ist die Dichtung des ringförmigen Sitzes zwischen diesem und dem Wasserzylinder besonders wichtig. In dieser Hinsicht lassen die meisten Konstruktionen noch zu wünschen übrig. Wegen der verschiedenartigen Ausdehnung des Untersatzes und des Zylinders ist auf elastische Dichtung Wert zu legen. Am besten eignet sich hierfür ein nicht zu dünner Asbestring oder auch ein Strick aus Stahlwolle, der in einen Falz des Untersatzes eingelegt wird, d in Abb. 17. Der Außenrand des Falzes soll genügend über den Zylinder übergreifen, um die Dichtung zu schützen. Wenn der Mantel des Untersatzes aus Stahlblech besteht und der Türrahmen aufgeschraubt wird, sind die Auflageflächen ebenfalls durch Einformen eines Nutes, der mit Kesselkitt ausgestrichen wird, zu dichten, e in Abb. 17.

Vergrößerung der Heizflächen

Hinsichtlich der Gestaltung der Heizfläche hat man bei Schwelkoks, worauf bereits früher hingewiesen wurde, wegen der geringen Verschmutzungsgefahr größere Freiheiten und kann die wärmeaufnehmenden Flächen z.B. durch Rippen oder Verlängerung des Rauchgasweges vergrößern. Selbstverständlich müssen sie für eine in größeren Zeitabständen vorzunehmende Säuberung leicht zugänglich sein. Im Flammrohr des Wasserzylinders können Rippen oder Prellbleche eingebaut werden. Bei Öfen mit eingebauter Feuerung kann man einen Sturzzug oder eine Unterteilung der Rauchgaskanäle vorsehen, Abb. 18 a bis d.

d. Kombination der Warmwasserbereitung mit anderen Feuerstätten

Wenn Schwelkoks als Brennstoff zur Verfügung steht, verspricht auch die Kombination der Warmwasserbereitung mit

anderen Feuerstätten besonders bei Küchenherden gute Wirtschaftlichkeit. Auf zwei solcher Lösungen, die in unserem Prüfstand entwickelt wurden und die sich bei Braunkohlenbriketts gut bewährt haben, sei hier hingewiesen. Bei Schwelkoks ist mit einem noch günstigeren Ergebnis zu rechnen, weil er eine gleichmäßigere Wärmeentwicklung und einen für den praktischen Betrieb unbegrenzten Dauerbrand ermöglicht.

Nachgeschalteter Heizkessel im Herd mit offener Kochplatte

Die erste Lösung geht davon aus, daß die Hauptfunktionen des Herdes - das Kochen, Braten und Backen - durch vorhergehenden Entzug von Wärme für die Warmwasserbereitung nicht gestört werden dürfen. In dieser Hinsicht befriedigen andere Lösungen, bei denen z.B. Heizschlangen um die Herdfeuerung herumgelegt werden, nicht, weil sie einen großen Teil der Wärme aufnehmen, der dann für die ausreichende Beheizung der Kochplatte und des Bratofens fehlt. Außerdem muß bei größerem Bedarf an Warmwasser der Herd längere Zeit stark beheizt werden, auch wenn für andere Zwecke kaum noch Wärme benötigt wird.

Für die Warmwasserbereitung soll, damit sie in der Kombination wirtschaftlich ist, in erster Linie die Abfallwärme verwendet werden. In betriebsschwachen Zeiten des Herdes soll dagegen die erzeugte Wärme möglichst voll für die Warmwasserbereitung nutzbar gemacht werden. Diese Forderungen werden in hohem Maße durch die in Abb. 19 a dargestellte Konstruktion erfüllt. Die Feuerung ist in der Herdmitte angeordnet. Bei normalem Betrieb des Herdes streichen die Verbrennungsgase unter der Herdplatte entlang, umspülen darauf den Bratofen und ziehen dann auf der anderen Herdseite durch einen aufsteigenden Zug des Wasserkessels zum Schornstein ab. Wenn Kochwärme nur in geringer Höhe benötigt wird, kann durch Umlegen

der Klappe K der Umbrand abgeschaltet und dafür der Sturzzug im Wasserkessel freigegeben werden. Entsprechend der höheren Temperatur der Verbrennungsgase, mit der sie jetzt in die Kesselzüge eintreten, steht auch die doppelt so große Kesselheizfläche zur Verfügung. Bei den ersten Ausführungen ließen wir die Herdkessel aus Stahlblech schweißen. Vorteilhafter ließen sie sich, wie Abb. 19 b zeigt, als gußeiserne Gliederkessel herstellen, da man bei ihnen freizügiger in der Formgebung ist und auf gleichem Raum eine größere Heizfläche unterbringen kann. Der Herdkessel wird mit einem Wärmeaustauscher durch Vor- und Rücklaufleitungen verbunden.

Heizschlange im Herd mit geschlossenem Kochraum

Die entgegengesetzte Lösung, nämlich die Heizschlange um die Feuerung zu legen, läßt sich beim Herd mit geschlossenem Kochraum anwenden. Die oben geschilderten Bedenken, daß dadurch die Beheizung des Herdes beeinträchtigt wird, besteht hier nur in geringem Maße, weil der Boden des Kochraumes unmittelbar von dem Glutbett angestrahlt wird und dadurch schon eine intensive Beheizung erfolgt. Die Wärme, die an die Heizschlange abgegeben wird, ist in diesem Falle natürlich keine Abfallwärme, sondern sie muß - wenigstens teilweise - zusätzlich erzeugt werden. Die Rostfläche ist daher entsprechend zu vergrößern. Da die Heizflächenbelastung der Schlange mit mindestens 18 000 kcal/m^{2}h anzusetzen ist und die feuerberührte Heizfläche etwa 0,11 m^2 beträgt, ist der Rost um etwa 100 cm^2 größer zu bemessen. Der Heizkessel wird wieder mit einem Wärmeaustauscher verbunden. Dieser kann entweder an beliebiger Stelle aufgehängt oder, wie es in Abb. 20 angegeben ist, auch unmittelbar auf den Herd aufgesetzt werden. In diesem Falle hat man den Vorteil, daß er von dem Rauchgasen im letzten Zug noch teilweise umspült und erwärmt wird.

e. Versorgung mehrerer Zapfstellen vom Badeofen aus

Die Bedeutung der Warmwasserversorgung wird noch vielfach verkannt und mitunter sogar als übertriebener Luxus abgelehnt. Um die vielseitige Verwendbarkeit der Badeöfen und Klein-Warmwasserbereiter für die Versorgung mehrerer Zapfstellen zu zeigen, seien kurz einige Beispiele gebracht. Dabei muß ausdrücklich betont werden, daß sowohl die Anlagekosten als auch der Betrieb selbst für einen minderbemittelten Haushalt tragbar sind. Wenngleich die Hinweise nur in losem Zusammenhang mit dem Thema stehen, sind sie doch angebracht, weil wegen der hervorragenden Eignung des Schwelkokses für diesen Zweck gerade die Versorgung dieses Verbrauchssektors besonders verlockend erscheint.

Bekanntlich werden die Badeöfen und die nach dem gleichen Prinzip arbeitenden Klein-Warmwasserbereiter nur mit geringer Wandstärke hergestellt; sie sind daher nicht druckfest; infolgedessen dürfen sie nicht dem normalen Wasserleitungsdruck ausgesetzt werden. Der Warmwasserhahn der am Badeofen angebrachten Batterie verschließt aus diesem Grunde die Kaltwasser-Zuflußleitung zum Badeofen, während der Ausfluß stets offen bleibt. Beim Öffnen des Warmwasserhahnes wird dann kaltes Wasser in den Badeofen gedrückt und dieses verdrängt das im Badeofen befindliche warme Wasser, das durch eine von der Decke des Wasserzylinders abgehende Leitung je nach Stellung entweder aus dem Warmwasserhahn oder der Brause ausläuft.

Anlagen mit Dreianschlußhahn

Wenn man eine oder mehrere Zapfstellen vom Badeofen aus mitversorgt werden sollen, muß man für diese auch einen Dreianschlußhahn verwenden; eine Ausführungsform dafür gemäß einer Konstruktion des Verfassers zeigt Abb. 21 a.

Die Warmwasserleitung muß hinter jeder Zapfstelle nach oben abgesetzt werden, um zu verhindern, daß bei Öffnen einer vorhergehenden Zapfstelle das Wasser durch die stets offene Brauseleitung herausfließt, Abb. 21 b. Die Montage einer derartigen Anlage ist verhältnismäßig schwierig, weil jede Zapfstelle drei Anschlüsse hat. Sie sollte daher nur angelegt werden, wenn außer dem Bad nur eine weitere Zapfstelle zu versorgen ist.

Anlagen mit Schwimmkugelgefäß oder Reduzierventil

Wesentlich einfacher gestaltet sich die Montage, wenn von vornherein eine Verminderung des Wasserleitungsdruckes auf ein für den Badeofenkörper zulässiges Maß vorgenommen wird. Je nach Bauart verträgt der Ofen einen Druck von 2 bis 5 m WS. Der Druck kann durch ein Schwimmkugelgefäß, das in die Wasserleitung vor den Badeofen eingebaut wird, vermindert werden, Abb. 22 a. Die für die Überwindung der Rohrleitungswiderstände verfügbare Druckhöhe ist dann durch den Abstand zwischen Wasserspiegel im Schwimmkugelgefäß und Zapfstelle gegeben. Noch einfacher gestaltet sich die Anlage, wenn statt des Schwimmkugelgefäßes ein Druckminderventil eingebaut wird, weil dann der Rohrleitungsplan genau so einfach wie bei der üblichen unter Leitungsdruck arbeitenden Warmwasserversorgung ist, Abb. 22 b. Ein zuverlässig arbeitendes Druckminderventil, das als Membranventil mit Federbelastung ausgebildet ist, wurde speziell für diesen Zweck von den Eschebach-Werken, Radeburg, entwickelt, Abb. 23.

Anwendbarkeit dieser Anlagen und Vorteile des Schwelkokses

Solche Klein-Warmwasserversorgungen sind im Betrieb sehr sparsam, weil sie einmal mit gutem Wirkungsgrad arbeiten und zum anderen ihr Betrieb den jeweiligen Bedürfnissen

bestens angepaßt werden kann. Zudem sind sie für die verschiedensten Zwecke geeignet: Im Haushalt für Bad, Waschtisch und Spülbecken, in gewerblichen Betrieben (Frisörgeschäften) und kleinen Fabriken für Reihenwaschanlagen usw. Es bedarf keiner nochmaligen Betonung, daß der Schwelkoks in diesen Anlagen wegen der bequemen Bedienung und des sparsamen Verbrauchs besonders vorteilhaft zu verwenden ist.

III. Die Raumheizöfen

a. Aufgaben der Öfen und ihre Haupttypen

Aufgaben

Während bei den bisher behandelten Feuerstätten die baulichen Anforderungen, die sich aus den Brenneigenschaften ergaben, bei den gasreichen Brennstoffen und dem sehr reaktionsfähigen Schwelkoks nahezu übereinstimmten, bestehen bei den Raumheizöfen in dieser Hinsicht wesentliche Abweichungen. Dort ergab sich aus dem üblichen Benutzungsgrad der Herde und Warmwasserbereiter die Forderung, die Wärmeerzeugung kurzzeitig auf volle Leistung zu bringen und sie dann je nach den vorliegenden Bedürfnissen allmählich abklingen zu lassen; hier soll die Wärme an den Raum entsprechend dessen Wärmeverlusten laufend abgegeben werden, so daß eine möglichst gleichbleibende Wärmeleistung des Ofens angestrebt wird. Wenn dort mitunter eine stärkere Wärmeerzeugung über längere Zeit erforderlich ist, wird Brennstoff zwar auch in kleinen Mengen, dafür aber häufig, aufgegeben, so daß das Prinzip der stets nur flach beschickten Planrostfeuerung mit den gleichen Vorbedingungen für eine gute Verbrennung der gasförmigen Bestandteile bei Kohlen und Schwelkoks

gewahrt bleibt. Bei den Heizöfen muß jedoch, da man ihre Bedienung nur ein oder wenige Male am Tage vornehmen will, die Wärme entweder in dem Brennstoffvorrat des Füllschachtes verfügbar gehalten oder, schon frei gemacht, in der Ausmauerung des Ofens gespeichert werden, so daß sie allmählich entsprechend der jeweiligen Außentemperatur an den Raum abgegeben werden kann.

Speicherofen und Dauerbrandofen

Die beiden Ofenarten - der Speicherofen, als dessen typischer Vertreter der vom Töpfer gesetzte Kachelofen anzusehen ist, und der Dauerbrandofen, der überwiegend aus Gußeisen hergestellt wird - sind nebeneinander entwickelt worden und sind je nach den verfügbaren Brennstoffarten und örtlichen Gewohnheiten in Deutschland etwa im gleichen Umfange verbreitet. Der Speicherofen ist in erster Linie für die gasreichen Brennstoffe - Holz, Braunkohlenbriketts, auch jüngere, gashaltige, nicht backende Steinkohle - geeignet, während der Dauerbrandofen für die älteren, gasarmen Kohlen, EGkohle, Anthrazit und den durch Entgasung künstlich gealterten Brennstoff Koks - bevorzugt in Frage kommt.

Eignung des Schwelkokses

Der Schwelkoks, in dem die besten Eigenschaften aller vorgenannten Brennstoffe vereinigt sind, läßt sich in den beiden Ofenarten mit mindestens dem gleichen Wirkungsgrad verfeuern wie die anderen Brennstoffe. (Vorausgesetzt wird nur verständnisvolle Bedienung, d.h. der Schwelkoks darf nicht in zu großer Schütthöhe aufgegeben werden, da dann wegen seiner hohen Reaktionsfähigkeit mit erheblichem Verlust an CO zu rechnen ist.) Trotz dieses Vorteils wird man unter den vorhandenen Typen der Heizöfen jene

auswählen, die den Brenneigenschaften des Schwelkokses am besten entgegenkommen und die im Hinblick auf Herstellungs- und Betriebskosten die wirtschaftlichste Lösung ergeben.

Der vom Töpfer gesetzte Kachelofen [2] ist dank seiner schweren Ausmauerung in der Lage, eine große Wärmemenge zu speichern und braucht daher selbst bei strenger Kälte nur ein- oder zweimal täglich aufgeheizt zu werden. Nachdem der Brennstoff ganz durchglüht und stark heruntergebrannt ist, wird der Ofen dicht geschlossen, so daß keine Wärme aus seinem hocherhitzten Innern mit durchströmender Luft in den Schornstein fortgeführt werden kann. Diese Art der Bedienung entspricht vor allem den Brenneigenschaften der gasreichen Brennstoffe, bei denen ein gleichmäßiger Abbrand wegen der Änderung der Zusammensetzung der brennbaren Substanz nur in beschränktem Maße möglich ist. Andererseits wäre es aber verfehlt (und es würde dem Gedanken des Speicherofens widersprechen), wollte man ihn im Dauerbrand betreiben, d.h. den aufgegebenen Brennstoff durch Drosseln der Verbrennungsluftmenge allmählich abbrennen lassen. Bei Verwendung von Schwelkoks in Kachelöfen müßte man aber dann den Hauptvorzug dieses Brennstoffes, nämlich seinen regelbaren Dauerbrand von vornherein aufgeben. Im Kachelofen bietet er daher gegenüber den anderen gasreichen Brennstoffen keine überzeugenden Vorteile. Da er, bezogen auf die Heizleistung, wesentlich teurer als der eiserne Ofen ist, wäre es in keiner Weise gerechtfertigt, den Kachelofen für die Verwendung von Schwelkoks umzukonstruieren.

Hingegen entspricht der Dauerbrandofen sehr dem Wesen des Schwelkokses. Die Wärmespeicherfähigkeit des Dauerbrandofens ist gering, weil er entweder gar nicht ausgemauert oder nur insoweit mit Schamottesteinen ausge-

füttert ist, wie es zum Schutze des Eisenmantels erforderlich erscheint. Die durch den Brennstoffabbrand frei gemachte Wärme wird also ohne große Verzögerung an den Raum abgegeben. Die Homogenität in der Zusammensetzung der brennbaren Substanz beim Schwelkoks ermöglicht es, den Abbrand dem Heizbedürfnis genauestens anzupassen und eine zeitweilige Übererwärmung des Raumes zu vermeiden. Besonders wichtig ist dies für die Übergangszeiten, in denen die Außentemperaturen über und um 0° liegen und der Heizbedarf entsprechend niedrig ist. Hier treten die Ersparnismöglichkeiten bei Verwendung von Schwelkoks gegenüber anderen, nicht so reaktionsfähigen Brennstoffen am stärksten in Erscheinung. Beim Hochtemperaturkoks kann beispielsweise die Abbrandgeschwindigkeit bei weitem nicht so stark gedrosselt werden, ohne daß die Gefahr des Erlöschens besteht. Wenn man bei ihm auf sparsamen Verbrauch in der Übergangszeit Wert legt, bleibt nur übrig, auf die Annehmlichkeit des ununterbrochenen Betriebes zu verzichten und den Ofen täglich neu für einige Stunden anzuheizen.

b. Die eisernen Dauerbrandöfen

Bauart der Dauerbrand- und Unterbrandöfen

Bei den Dauerbrandöfen wird nach der Feuerungsweise zwischen Durchbrand- und Unterbrandöfen unterschieden. Bei der ersten Art wird der in den Füllschacht aufgegebene Brennstoffvorrat allmählich von unten nach oben verbrannt. Die Verbrennungsgase brennen also durch den Brennstoffvorrat hindurch. Bei den Unterbrandöfen (Abb. 24 a und b) findet die Verbrennung außerhalb des Füllschachtes auf dem Rost statt. Der bevorratete Brennstoff rutscht entsprechend dem Abbrand aus dem Füllschacht nach.

Eignung für den Schwelkoks

Auch hier erhebt sich wieder die Frage, welche Feuerungsweise - Durchbrand oder Unterbrand - für den Schwelkoks zweckmäßiger ist. Auszugehen ist dabei von der Tatsache, daß der Schwelkoks sehr reaktionsfähig ist und daß daher, wenn er in zu hoher Schicht, vor allem bei angestrengter Leistung, verfeuert wird, mit größeren Rauchgasverlusten infolge unvollkommener Verbrennung zu rechnen ist. In dieser Hinsicht ist die Auswirkung beim Schwelkoks ähnlich wie bei den gasreichen Brennstoffen, bei denen in der Entgasungsperiode auch ein nicht restloser Ausbrand der Schwelprodukte in Kauf genommen werden muß. In den Baubestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und Einsätze [3], die, ebenso wie die früher schon erwähnten für Dauerbrandherde, bezwecken, die Qualität der fabrikmäßig hergestellten Öfen zu heben, ist darauf insofern Bedacht genommen, daß als nutzbare Füllschachthöhe nur 2/3 der Höhe zwischen Rost und Ofendecke eingesetzt ist. Es ist also noch ein ausreichender Verbrennungsraum vorhanden. Damit bei der Bedienung durch Laien eine zu hohe Füllung verhindert wird, haben auf Anregung der Braunkohlenindustrie die meisten Hersteller bei ihren eisernen Öfen schon in etwa 2/3 Höhe der Vorderwand die Fülltüren angebracht. Für den Schwelkoks ist diese konstruktive Maßnahme auch sehr wichtig, zumal er wegen seiner durchschnittlich kleineren Korngröße ziemlich dicht lagert und dadurch die Gefahr des Luftmangels bei der Verbrennung erhöht wird.

Mit zunehmendem Abbrand verringert sich die Brennstoffschicht im Füllschacht, die Leistung sinkt allmählich ab und wegen des zunehmenden Luftüberschusses verschlechtert sich auch der Wirkungsgrad. In dieser Hinsicht sind die Unterbrandöfen für den Schwelkoks den Durchbrandöfen

erheblich überlegen. Neben den allbekannten Anthrazit-Dauerbrandöfen sind auch die für andere bitumenhaltige Kohlen (stückige Braunkohlen und nichtbackende Gasflammkohle) entwickelten Unterbrandöfen für den Schwelkoks sehr gut geeignet.

6. Bauliche Einzelheiten beim Durchbrandofen

Auf Einzelheiten der konstruktiven Ausbildung der Dauerbrandöfen für Schwelkoks soll hier nur insoweit eingegangen werden, als sie nach den Versuchsergebnissen besondere Beachtung verdienen. Im übrigen sind alle grundsätzlichen konstruktiven Forderungen in den "Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und eiserne Dauerbrandeinsätze" bereits niedergelegt. Zudem kann die Konstruktion der eisernen Dauerbrandöfen, die in gegenseitigem Wettbewerb der Firmen dauernd verbessert werden, als recht ausgereift gelten.

Größe und Form des Rostes, Stehplatte

Es ist besonders wichtig, die Größe und die Form des Rostes festzulegen. In dem erwähnten BGP ist der Begriff "Nennrostfläche" eingeführt. Dieser Begriff entspricht bei Durchbrandöfen dem mittleren Querschnitt des Füllschachtes, bei Unterbrandöfen mit Planrost der Gesamtrostfläche und bei solchen mit Korbrost dessen oberem lichten Querschnitt. Diese Definition ist mit Bedacht gewählt, weil bei den Durchbrandöfen die Verbrennung sich über den ganzen Schachtquerschnitt erstreckt, dieser also gewissermaßen die Gesamtrostfläche darstellt. Eine stärkere Einschnürung des Füllschachtes in Rosthöhe ändert an den Verhältnissen nichts, sondern beeinträchtigt nur die Luftverteilung über das ganze Brennstoffbett und verschlechtert die Entaschungsmöglichkeit. Es er-

scheint infolgedessen angebracht, die tatsächliche Restfläche nicht wesentlich kleiner auszuführen.

Die Form des Rostes läßt häufig noch manche Forderungen unerfüllt, die gerade für den Schwelkoks wichtig erscheinen. Im allgemeinen wird der Rost als Teller-Rütteirost ausgeführt. Oft ist aber der Teller so klein, daß es trotz längeren Rüttelns nicht gelingt, die Asche zu entfernen. Knaggen, gemäß Abb. 25 a, die über den feststehenden Teil des Rostes übergreifen und die Asche aus den Ecken räumen sollen, stellen auch keine besonders gute Lösung dar, weil bei weniger stückfestem Koks der Verlust durch Abrieb zu groß wird. Die günstigsten Verhältnisse erhält man bei den Durchbrandöfen, wenn man einen Rundrost, dessen Durchmesser etwas größer als der Schachtquerschnitt ist, einbaut und mit Formsteinen den rechteckigen Schachtquerschnitt oberhalb des Rostes in einem Kreisquerschnitt überführt, Abb. 25 b. Die ganze Brennstoffsäule ruht dann nur auf dem beweglichen Teller. Wenige schwache Bewegungen genügen, die Asche vom Rost abregnen zu lassen. Wichtiger ist jedoch noch, das ganze Glutbett schonend zu bewegen, wodurch die an den einzelnen Koksstückchen anhaftende Asche abgestreift wird. Durch das damit verbundene Zusammensacken der Glut wird die Koksglut neu belebt. Etwa gleichwertig ist die im Abb. 25 c angegebene Rostform, bei der der Gußkranz am festen Teil des Rostes fortgelassen ist, so daß der Teller bis an den Rand des Schachtes reicht. Andere ebenfalls befriedigende Formen sind viereckige Schüttelroste, deren Drehpunkt meistens in der Mitte liegt. Diese Roste müssen jedoch weit genug unter einen Rahmen untergreifen, damit beim Schütteln an den Ecken keine Spalten freigegeben werden, in denen sich Koksstückchen festklemmen können.

In der Regel wird jetzt bei eisernen Öfen statt gesonderter Feuer- und Aschentür eine größere Tür eingebaut, durch die sowohl der Feuer- als auch der Aschenraum zugänglich ist, a in Abb. 26. Der Feuerraum ist vorn durch eine Stehplatte abgeschlossen, die den Eintritt von Luft in den Feuerraum oberhalb des Rostes verhindern soll, b in Abb. 26. Dieser Zweck kann aber nur erfüllt werden, wenn die Stehtür allseitig gegen einen übergreifenden Rahmen, c in Abb. 26, schlägt. Häufig ist darauf nicht Bedacht genommen. Für Schwelkoks äußert sich das dann sehr nachteilig, weil das Feuer schief brennt und eine genaue Regelung der Verbrennungsleistung unmöglich wird. Außerdem wird durch den ungleichmäßigen Brand die Gefahr der Schlackenbildung erhöht.

Zugführung

Von untergeordneter Bedeutung ist es, ob die Durchbrandöfen für Schwelkoks nur mit Deckenzügen oder mit Sturz- und Steigzügen ausgestattet werden. Angesichts der hohen Reaktionsfähigkeit des Schwelkokses wirkt sich jedoch der höhere Widerstand der Sturzzugöfen auf die Gleichmäßigkeit des Abbrandes günstig aus, er stellt eine wirksame Bremse gegen das "Durchgehen" des Schwelkokses bei starkem Schornsteinzug dar.

Dichte Ausführung

Daß auch bei den eisernen Dauerbrandöfen die Dichtheit in allen Teilen für die wirtschaftliche Verfeuerung des Schwelkokses von ausschlaggebender Bedeutung ist, bedarf nach den früheren Ausführungen keiner besonderen Betonung. Die dort vorgeschlagenen konstruktiven Maßnahmen gelten sinngemäß auch für die Dauerbrandöfen.

Maßnahmen zur Stubenreinheit

Bei Aufstellung der Heizöfen in Wohnräumen ist der Stubenreinheit erhöhte Bedeutung beizumessen. Weder beim Nachfüllen von Schwelkoks, noch beim gelegentlichen Rütteln des Rostes und erst recht nicht beim Entleeren des Aschenkastens darf Schmutz in der Umgebung des Ofens entstehen. Das Herausfallen von Koksstückchen oder Grus beim Beschicken wird verhindert, wenn die untere Zarge der Falltür nach innen abfällt. Bei Klapptüren empfiehlt es sich, am Türinnern eine drehbare Klappe anzubringen, wie dies bereits früher (c in Abb. 17) vorgeschlagen wurde. Die Rüttelvorrichtung muß von außen bequem zu betätigen sein, ohne daß ein Öffnen der Aschentür erforderlich ist. Der Aschenkasten muß genügend groß sein. Sein Inhalt muß je 1 m^2 Heizfläche mindestens 3,5 l betragen, damit er auch bei aschereichen Schwelkoks die anfallende Asche bequem fassen kann. Vor allem ist es wichtig, daß er, ganz in den Aschenraum eingeschoben, vorn bis an die Tür reicht, damit aus dem Feuerraum keine Asche vor den Kasten fallen kann, d in Abb. 25.

d. Bauliche Einzelheiten bei Unterbrandöfen

Unterbrandöfen für Anthrazit

Von den Dauerbrandöfen mit unterem Abbrand ist der für Anthrazit am weitesten verbreitet, Abb. 24 b. Er ist, wie Versuche auf dem Prüfstand und in der Praxis ergaben, für Schwelkoks sehr gut geeignet. Es ist jedoch unbedingt darauf zu achten, daß der Füllschacht absolut dicht ist. Der Füllschachtdeckel, c in Abb. 24, der vielfach als Schiebedeckel ausgeführt ist, muß aufgeschliffen sein und gut auf dem Rahmen angepreßt werden können. Ebenso muß

der Füllschacht gegen den Feuerraum dicht sein, d in Abb. 24 b. Trifft dies nicht zu, dann brennt der Schwelkeks in dem Schacht hoch; dadurch wird jede Regelung der Leistung unmöglich gemacht, und außerdem muß damit gerechnet werden, daß der Ofen durch die auftretenden hohen Temperaturen beschädigt wird.

Unterbrandöfen für verschiedene Brennstoffe

In den letzten Jahren sind auch für gasreiche, nichtbackende Kohlen Unterbrandöfen entwickelt worden, Abb. 24 a. Bei ihnen ist der Füllschacht im Gegensatz zum Anthrazit-Unterbrenner nicht in der Mitte, sondern im Vorderteil des Ofens angeordnet. Dadurch wird zwar ein beachtlicher Teil der Ofenoberfläche als voll wirksame Heizfläche ausgeschaltet, man erreicht dadurch aber, daß der Füllschacht nicht so stark beheizt wird und die Vorentgasung des Brennstoffes eingedämmt wird. Für den Schwelkoks ist diese Überlegung nicht von so großer Bedeutung wie für die gasreichen Kohlen. Die Abmessungen des Füllschacht-Auslaufes, die Zuführung von Zweitluft in den Steigzug vom Aschfall aus haben sich aber auch für die vollkommene Verbrennung gut bewährt. Es ist wohl kaum damit zu rechnen, daß diese Konstruktion, so groß auch das technische Bedürfnis nach einer derartigen Lösung ist, allgemeinen Anklang finden wird, weil gerade die Vorderseite des Ofens nur teilweise zur Wärmeabgabe beiträgt.

e. Die Dauerbrandeinsätze

Diese Bedenken gelten weniger, wenn man die Konstruktion auf die Dauerbrandeinsätze, die zur Steigerung der Wärmeleistung in Kachelöfen eingebaut werden, anwendet. Der Einsatz hat hier in erster Linie die Aufgabe zu erfüllen,

durch allmählichen Abbrand des Brennstoffes gleichmäßig Wärme zu erzeugen, die zu einem Teil den nachgeschalteten Kachel- oder Eisenheizflächen zur Abgabe an die zu beheizenden Räume zugeleitet wird. Die Wärmeabgabe des Einsatzes selbst kann dahinter zurücktreten. Die Einsätze waren früher meistens nach dem Durchbrandprinzip gebaut und für die Verwendung von Hochtemperaturkoks eingerichtet. Da aber selbst bei diesem die Regelung der Leistung, besonders im unteren Bereiche zu wünschen übrig ließ, ging man dazu über, Einsätze mit unterem Abbrand zu bauen, Abb.27. Für die Verfeuerung von Schwelkoks sind diese nicht sonderlich geeignet, weil der Abstand Rost bis Unterkante Füllschacht, Abb. 27a und damit auch die Glühschicht bei Schwelkoks zu hoch ist, so daß der Verlust an CO recht groß wird. Diese Konstruktionen gaben aber die Anregung, einen Unterbrandeinsatz für Schwelkoks zu entwickeln. Wir lehnten uns dabei an eine Konstruktion der Fa. Pirwitz, Rügenwalde, an, die als Mantel für den aus Schamottesteinen gebauten Einsatz Stahlblechlamellen verwendete und dadurch eine sehr elastische Bauweise erzielte, Abb. 27b. Die einzelnen Maße für den Übergangsquerschnitt vom Füllschacht zum Steigzug, c in Abb.27 b, Querschnitt der Zweitluft, d in Abb. 27b, Rostgröße, e in Abb. 27b, sind der Skizze zu entnehmen. Erwähnt sei nur, daß bei einer Leistung von 4000 kcal/m^2h bei vollkommener Verbrennung ein CO_2-Gehalt von fast gleichbleibend 15 bis 16 % über jeweils 8 bis 10 Stunden erhalten wurde und daß er in den dazwischen liegenden Stunden mit geringer Leistung nicht unter 11 bis 12 % absank.

f. Die keramischen Dauerbrandöfen

Zum Abschluß sei noch ein kurzer Blick auf das Gebiet der ortsbeweglichen keramischen Öfen geworfen, um auch dort die Aussichten für die Verwendungsmöglichkeiten des

Schwelkokses zu untersuchen. Bisher beschäftigten sich nur wenige Firmen mit der Herstellung von keramischen Öfen. Erst der Mangel an Eisen zwang dazu, hierauf zurückzugreifen. Um Ordnung in dieses am wenigsten übersichtliche Gebiet zu bringen, wurden von den daran interessierten Stellen ebenfalls "Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für ortsbewegliche keramische Dauerbrandöfen" [4] aufgestellt. Eine Anzahl der darin enthaltenen Bestimmungen konnte jedoch noch nicht so scharf gefaßt werden wie bei den anderen Feuerstätten, weil die Erfahrungen noch zu weit auseinander gingen [5]. Die größere Freizügigkeit ~~(Übers. Freiheit)~~ bei der Gestaltung des Innenausbaus, die dadurch möglich ist, daß die Heizflächenbelastung in einem größeren Bereich frei gewählt werden kann, läßt Konstruktionen zu, die auch für den Schwelkoks gut geeignet erscheinen. Eine davon zeigt Abb.28 . Sie stellt einen Unterbrandofen mit beiderseitigem Abbrand dar. Gegenüber dem früher beschriebenen Ofen mit einseitigem Steigzug, Abb. 24 a, weist er den Vorteil auf, daß praktisch die ganze Oberfläche an der Wärmeabgabe beteiligt ist. Die Abmessungen des Überganges aus dem Füllschaft in die Steigzüge sowie die der Zweitluftquerschnitte, die sich für Schwelkoks als am günstigsten gezeigt haben, sind aus der Skizze ersichtlich.

C. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Eigenschaften des Schwelkoses, die sich nach Versuchen auf dem Prüfstand und in der Praxis als besonders wichtig und vorteilhaft für seine Verwendung in den Feuerstätten des Hausbrandes erwiesen hatten, behandelt. Anschließend wurde dann näher auf die grundsätzlichen Forderungen, die der Betrieb der Feuerstätten im besonderen bei Verwen-

dung von Schwelkoks verlangt, eingegangen. Im Hauptteil wurde dann eine Übersicht über die einzelnen Feuerstätten selbst und ihre bauliche Anpassung an die Eigenschaften des Schwelkokses gegeben. Bei jedem Teilgebiet wurde hier auf die Konstruktion, die als besonders günstig für die Verwendung von Schwelkoks anzusehen ist, hingewiesen.

Als Ergebnis der Arbeit ist zusammenfassend festzustellen, daß der Schwelkoks wie kein anderer Brennstoff dazu fähig ist, die Anforderungen auf allen Teilgebieten des Hausbrandes in idealer Weise zu erfüllen. Dank seiner nicht zu übertreffenden günstigen Brenneigenschaften gewährleistet er eine bis dahin nicht erreichte Wirtschaftlichkeit des Brennstoffverbrauchs der Feuerstätten; ferner bietet er der Hausfrau, weil sie die Feuerstätten spielend im Dauerbetrieb halten kann, große Arbeitserleichterung und Bequemlichkeit. Es ist daher damit zu rechnen, daß der stückige Schwelkoks, wenn er erst einmal in guter Qualität und Klassierung und in ausreichenden Mengen auf dem Markt verfügbar ist, leichten Absatz finden wird und daß für ihn auch gern ein höherer Preis geboten wird, als seinem Heizwert gegenüber anderen Brennstoffen entspricht. Dies wird mit dazu beitragen, die Kosten des Schwelprozesses günstig auf die einzelnen Produkte zu verteilen und damit die Treibstoffgewinnung durch Schwelung zu fördern.

gez. Odo Weimann
Dipl.Ing.

Schrifttum

[1] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für Dauerbrandherde aus Stahlblech
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V., Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.

[2] Reichsgrundsätze für Kachelofen- und Kachelherdbau. 6. völlig umgearb. Aufl.
Hrsg. Reichsinnungsverband des Töpfer- und Ofensetzerhandwerks. Berlin 19, Verlag Albert Lüdtke.

[3] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und eiserne Dauerbrandeinsätze.
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V. Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.

[4] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für ortsbewegliche keramische Dauerbrandöfen.
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V. Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.

[5] Weimann, O.: Der ortsbewegliche keramische Dauerbrandofen nach den Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen.
Wärmewirtschaft Bd. 14 (1941), S. 41/42.

Verzeichnung der Abbildungen und ihrer Unterschriften

a. Bratofen mit ausziehbarem Bodenblech

b. Dichtung des Bodenbleches durch Einlage eines Asbeststückes

c. Bratofen mit eingelegter gußeiserner Bodenplatte

d. Vollkommen geschlossener Bratofen, Reinigungstür unter dem Bratofen

e. Doppelte Bratofendecke zur Vermeidung zu starker Oberhitze

f. Breitere, niedrigere Form des Bratofens günstiger als höhere und schmälere.

Abb.8 Frontplatte mit Feuer- und Aschentür für Kochherde.

a. Umlaufender Falz am Rahmen für Kittfalz

b. Dichtflächen an Tür und Rahmen geschliffen

c. Kittfalzdichtung mit schwalbenschwanzförmigem Nut

d. Kittfalzdichtung mit kreisförmigem Nut

e. Kittfalzdichtung bei Stahlblechtür

f. Luftregelschieber unter einer Haube der Aschentür verdeckt

g. Schutzplatte in Feuertür über ganze Fläche reichend

h. Knebelverschluß

Abb.9 Maßnahmen zur Abdichtung der Herdplatten.

a. Ungenügende Abdichtung bei einfacher Überlappung

b. Dichtung zwischen Plattenrahmen und Blechwänden des Herdes durch Einlage eines Asbeststreifens

c. Falzdichtung zwischen Rahmen und Einleger

d. Falzdichtung zwischen Einleger und Kochlochdeckel

e. und f. Strömungstechnisch günstige Ausbildung der Falzdichtung

g. Zapfen zur Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Fläche auf der Unterseite des Kochlochdeckels

Abb.10 Umstellklappe für Umbrandherde.

a. Arretierung in Endstellungen der Klappe

b. Verbesserung der Dichtung durch Anbringen von Rippen an der Umstellklappe

Abb.11 Feuerung eines Herdes mit offener Kochplatte.

a. Rost in Herdmitte gelegen

b. Rostvorlage

c. Rost als Schieberost ausgebildet

d. Roststäbe gewellt zwecks besserer Entaschung

e. Ascheleitbleche unter dem Rost

Abb.12 Herd mit geschlossenem Kochraum (Schrankherd) der Firma Briel, Reutlingen

a. Wände des Kochraumes aus 10 mm starken keramischen Spezialplatten

b. Außenwände aus 50 mm starken keramischen Spezialplatten

c. Feuerung in Herdmitte

Abb.13 Schrankherd mit seitlich angeordneter Feuerung und daneben befindlichem Wasserkessel.

a. Vorderansicht

b. senkrechter Schnitt

Abb.14 Schrankherd mit Feuerung in der Mitte der Frontseite und Wasserkessel in der Herddecke

Abb.15 Ausführungsform des Kochraumes für einen Schrankherd.

Abb.16 Typen von Badeöfen.

a. Badeofen mit Feuerungsuntersatz und darüber befindlichem Wasserzylinder

b. Feuerung im Wasserraum eingebaut

Abb. 17 Badeofen-Untersatz.

a. Falltür mit Knebelverschluß

b. Schutzplatte in Falltür

c. Klappe an Falltür

Abb.18 Vergrößerung der Heizflächen von Badeöfen

a. Flammrohr gewellt

b. Flammrohr schraubenartig gewunden

c. Feuerung im Warmwasserbehälter eingebaut, Sturzzug und steigender Zug

d. desgl. mit zwei steigenden Zügen

Abb.19 Umbrandherde mit Mittelfeuerung und nachgeschaltetem Wasserkessel

a. Kessel aus Stahlblech geschweißt

b. Gußeiserner Kessel aus Gliedern zusammengesetzt

Abb.20 Herd mit geschlossenem Kochraum und einer um die Feuerung angeordneten Heizschlange.

a. Heizschlange

b. Wasserbehälter

c. Kochraum

Abb.21a Dreianschlußhahn für Warmwasserversorgung vom Badeofen aus.

d. Anschluß der Kaltwasser-Druckleitung

e. Anschluß für Kaltwasserleitung zum Badeofen

f. Anschluß für Warmwasserleitung vom Badeofen

Abb.21b Schaltschema für Warmwasserversorgung zweier Zapfstellen vom Badeofen aus unter Verwendung eines Dreianschlußhahnes f.

Abb.22a Schaltschema für Warmwasserversorgung vom Badeofen aus unter Verwendung eines Schwimmkugelgefäßes

c. Schwimmkugelgefäß

d. Kaltwasser-Druckleitung

e. Kaltwasserleitung zum Badeofen

f. Warmwasserleitung vom Badeofen

g. Ausdehnungsleitung

h. Überlaufleitung

Abb.22b Schaltschema für Warmwasserversorgung von einem Klein-Warmwasserbereiter aus unter Verwendung eines Reduzierventils

Abb.23 Druckminderventil für Warmwasserversorgung vom drucklosen Warmwasserbereiter aus.

k. Anschluß für Druckwasserleitung

l. Austritt des Wassers mit vermindertem Druck

m. Ventilteller

n. Gummi-Membrane

o. Druckfeder

Abb.24a Unterbrandofen für Anthrazit (linke Abb.)

c. Gutes Aufsitzen des Füllschachtdeckels

d. Abdichtung des Füllschachtes gegen Feuerraum

Abb.24b Unterbrandofen für gasreiche Kohlen

Abb.25 Rostformen für eiserne Dauerbrandöfen

a. Teller-Rüttelrost mit Eckenräumern

b. Großer, den ganzen Feuerraumquerschnitt einnehmender Teller-Rüttelrost

c. Großer Teller-Rüttelrost, bei dem am Rostrahmen der Gußkranz fortgelassen ist

Abb.26 Unterteil eines guten eisernen Dauerbrandofens

a. Kombinierte Feuer-Aschentür, Luft-Regelschieber oberhalb des Rostes

b. geschlossene Stehplatte

c. Über Stehplatte übergreifender Rahmen

d. Die ganze Ofentiefe einnehmender Aschenkasten

Abb.27 Dauerbrandeinsätze mit unserem Abbrand für Kachelöfen

a. Einsatz für Gaskoks

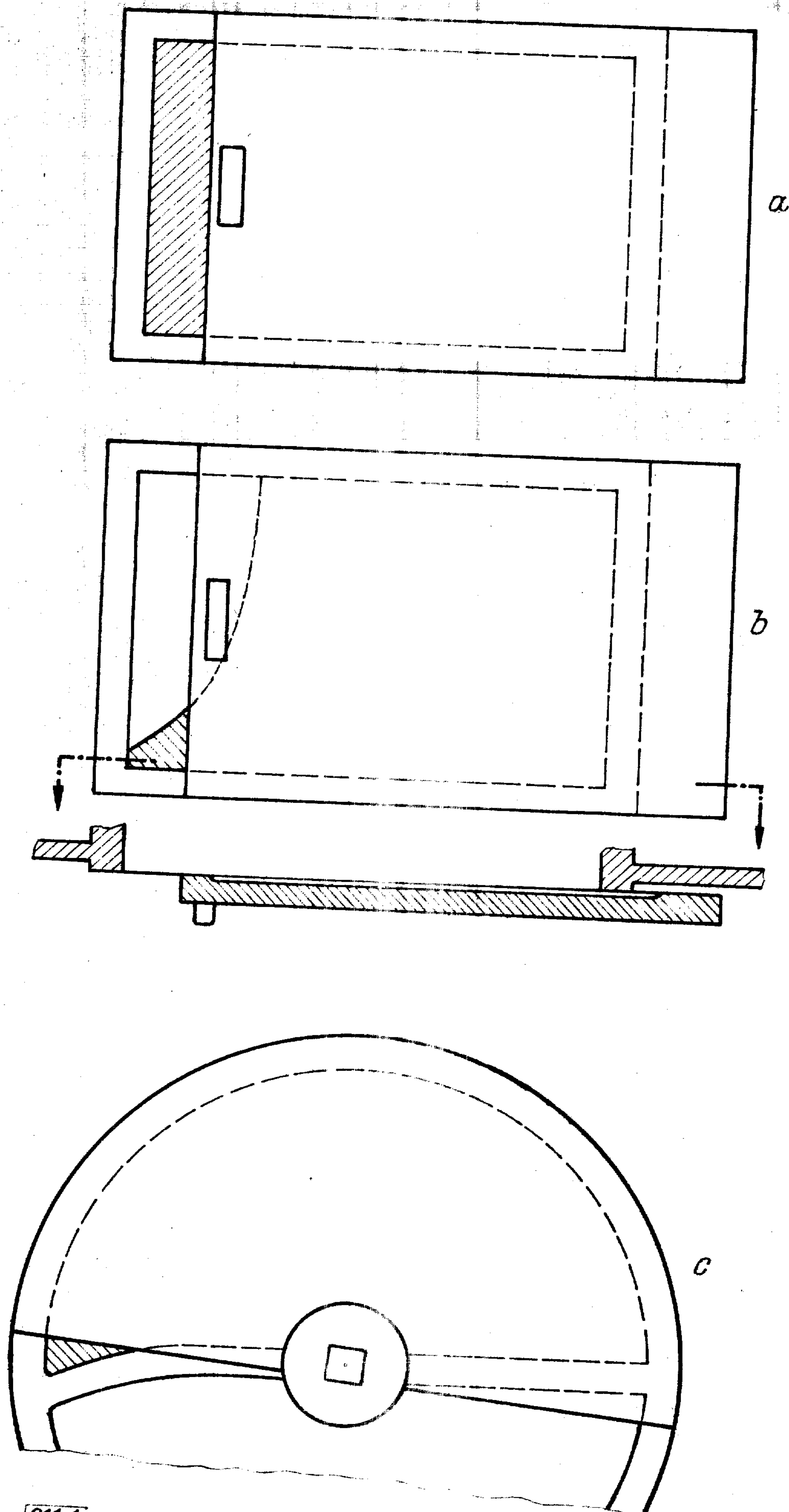
b. Einsatz für Schwelkoks

c. Höhe des Übergangsquerschnittes vom Feuerraum zum Steigzug max 80 mm

d. Querschnitt der Zweitluftöffnung 10 x 50 mm

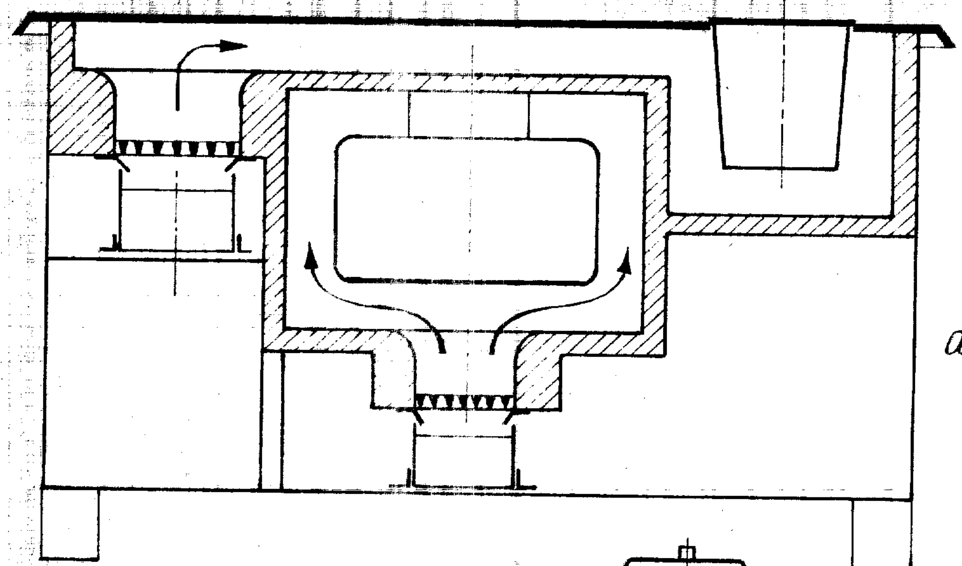
e. Rostgröße 240 x 240 mm²

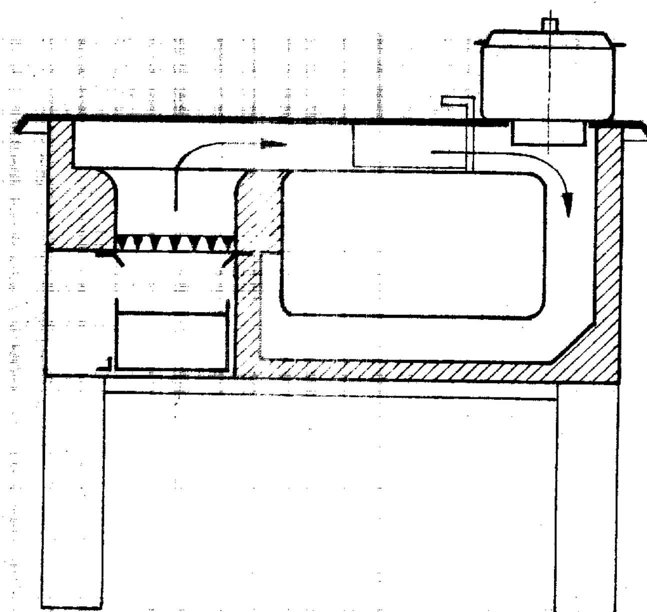
Abb.28 Keramischer Dauerbrandofen mit unterem Abbrand und beidseitigem Steigzug für Schwelkoks

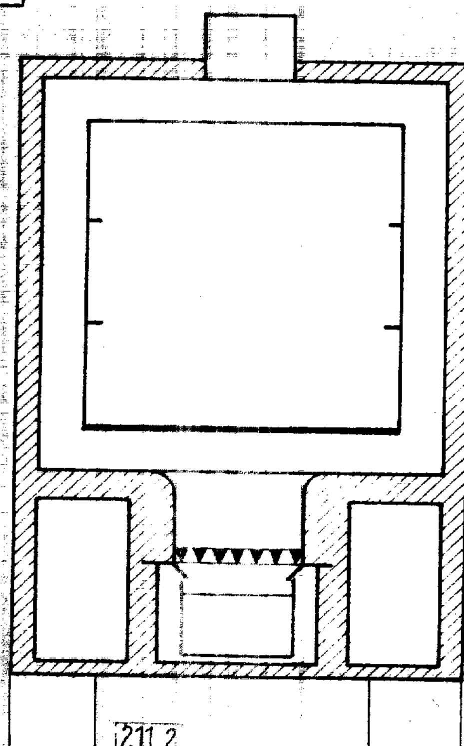


211.1

Abb.1 Рис.1







1211.2

Abb.2 Рис.2

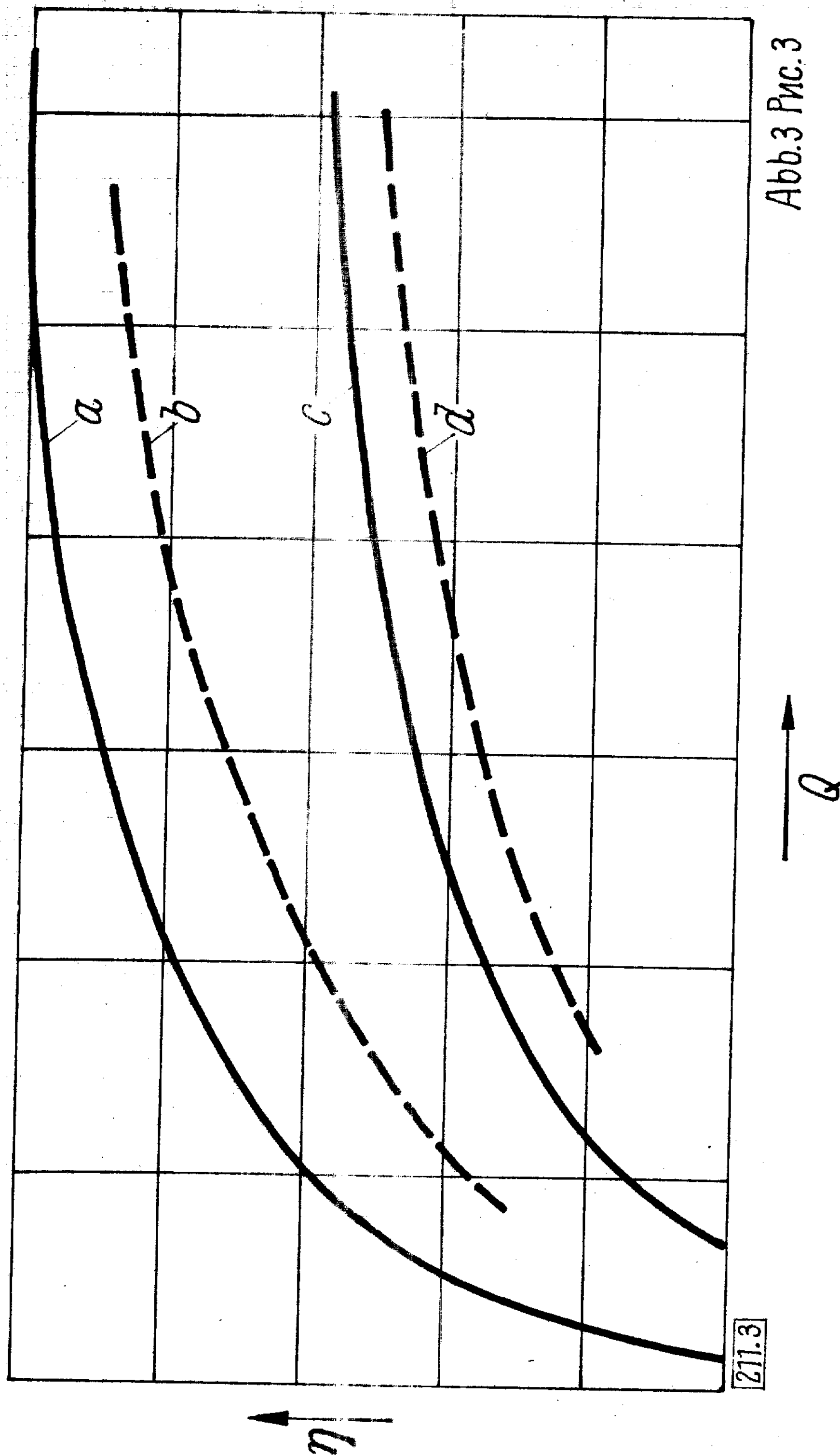
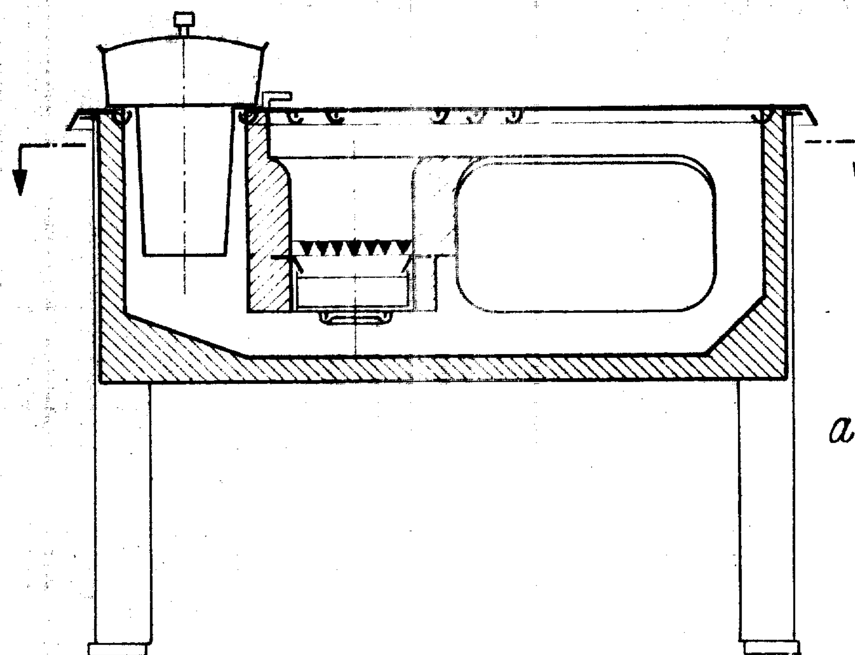


Abb.3 Рис.3



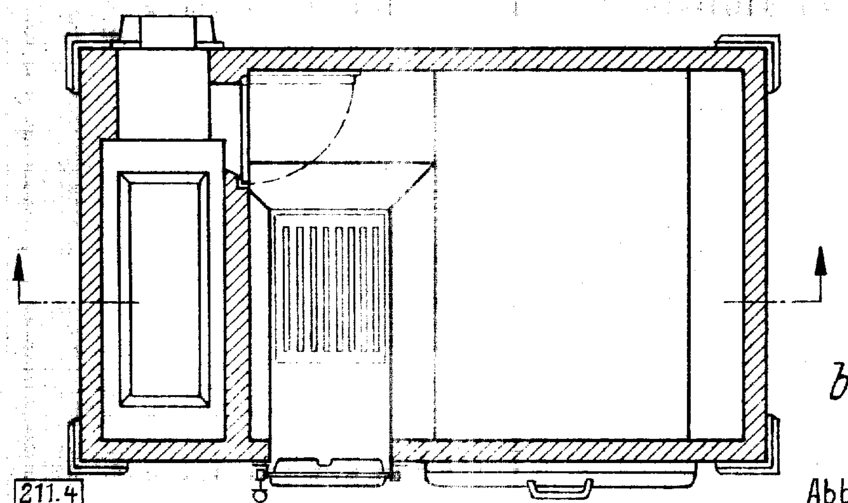


Abb.4 Рис.4

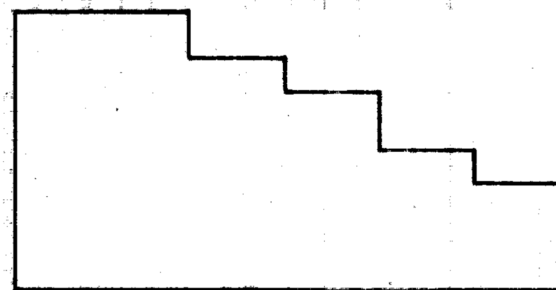


Abb.5 Рис.5

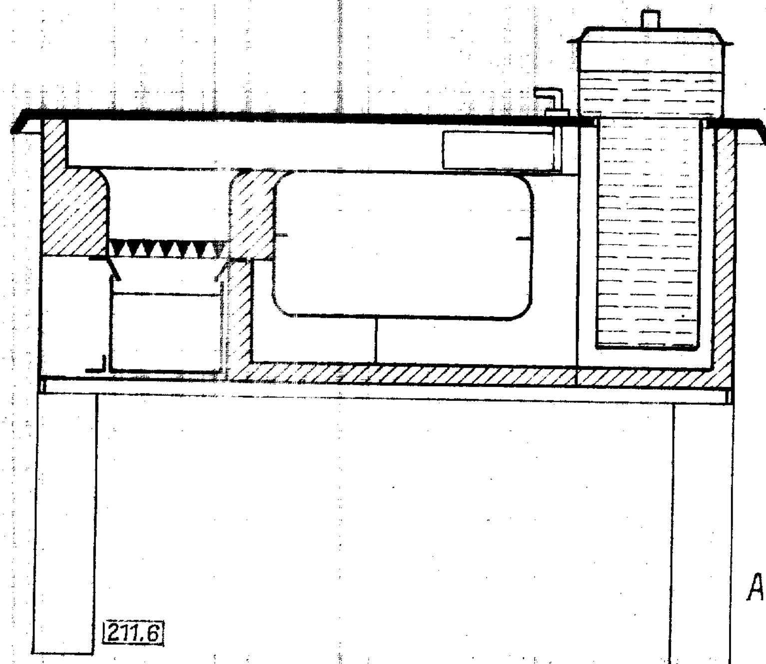
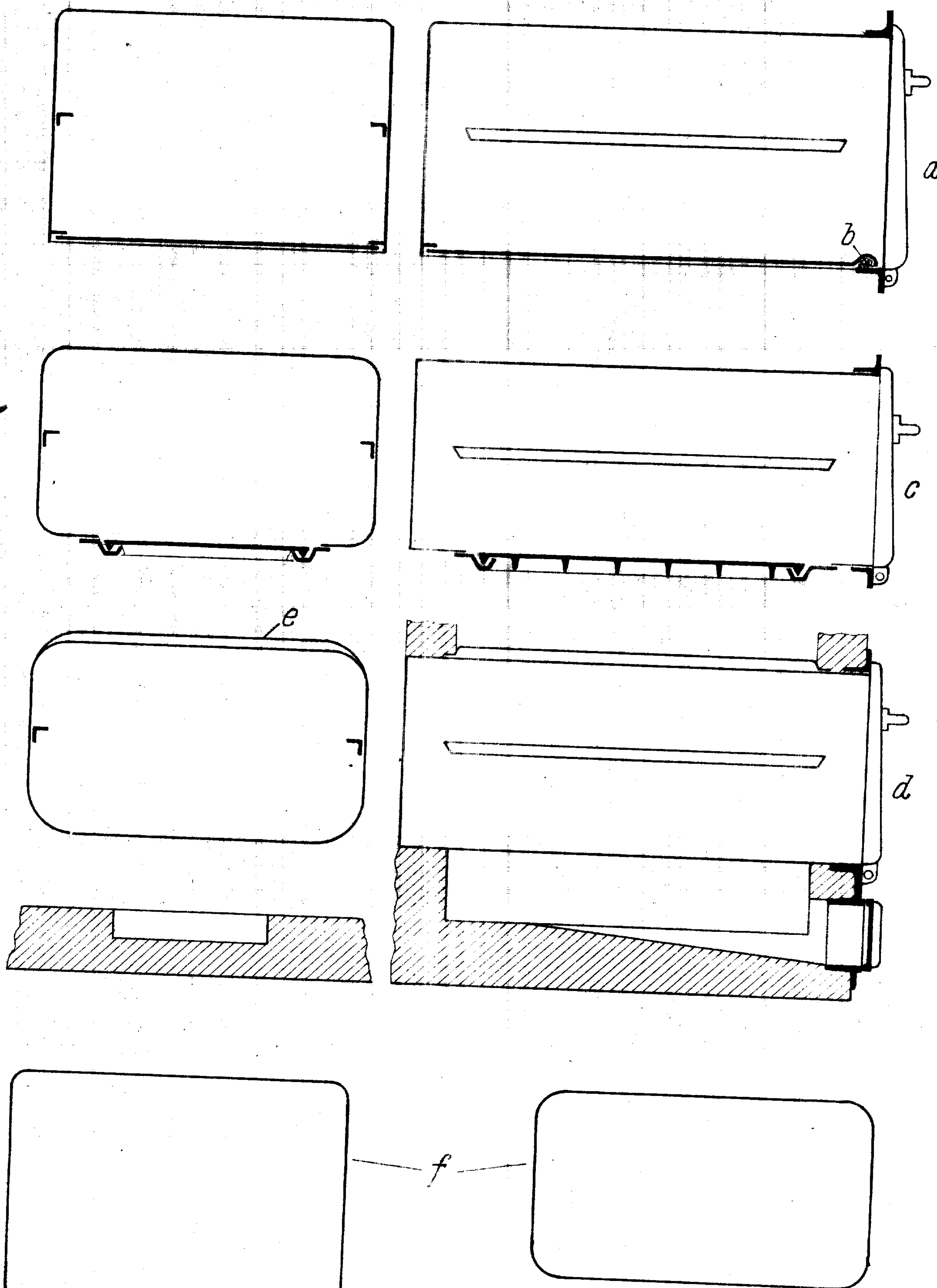
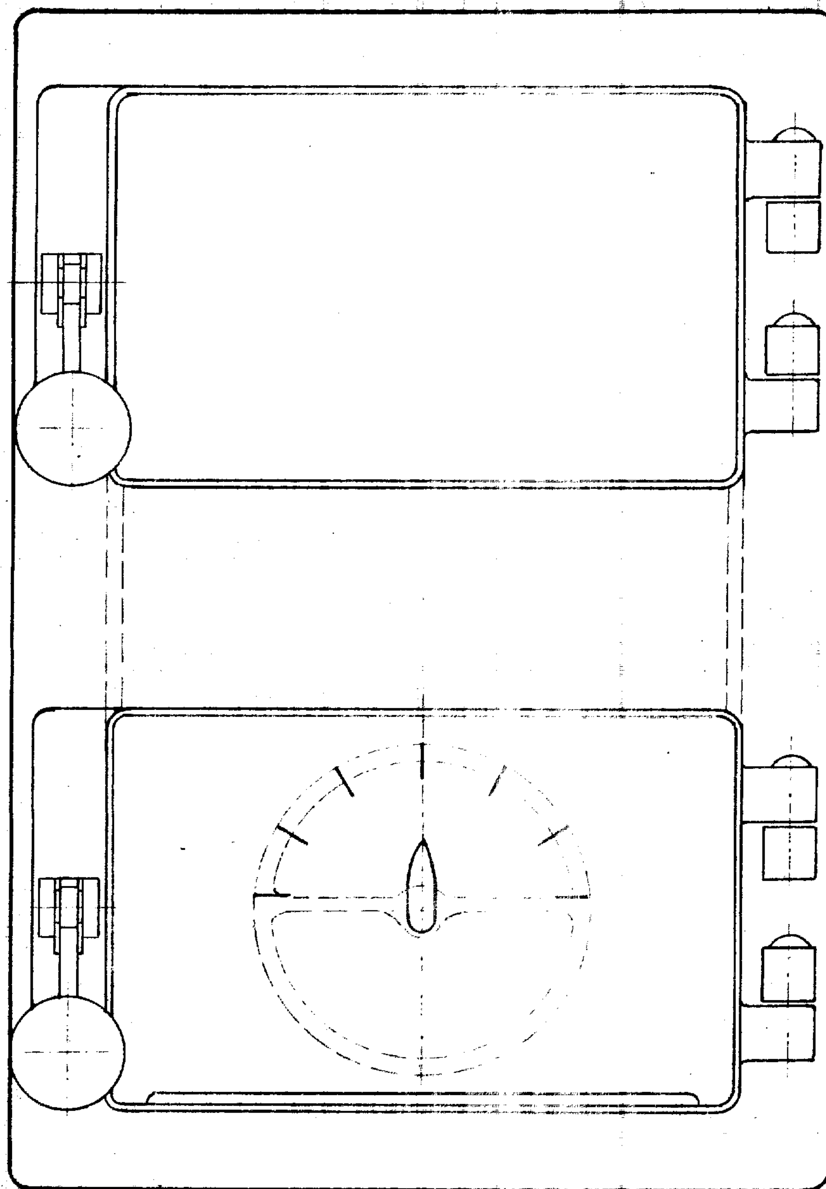


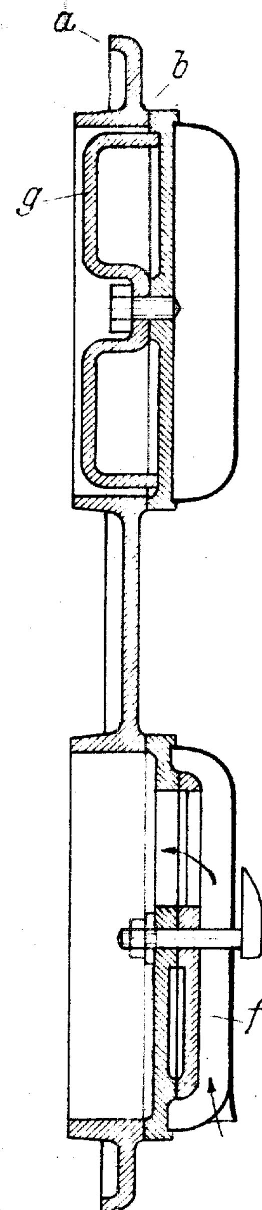
Abb.6 Рис.6

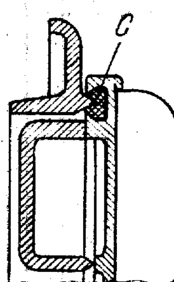


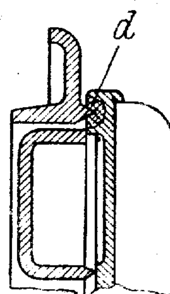
211.7

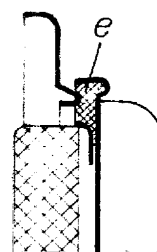
Abb.7 Рис.7

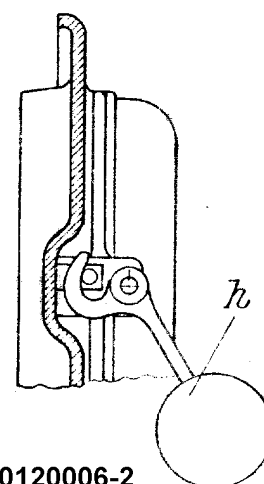












211.8

Abb.8 Рис.8

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

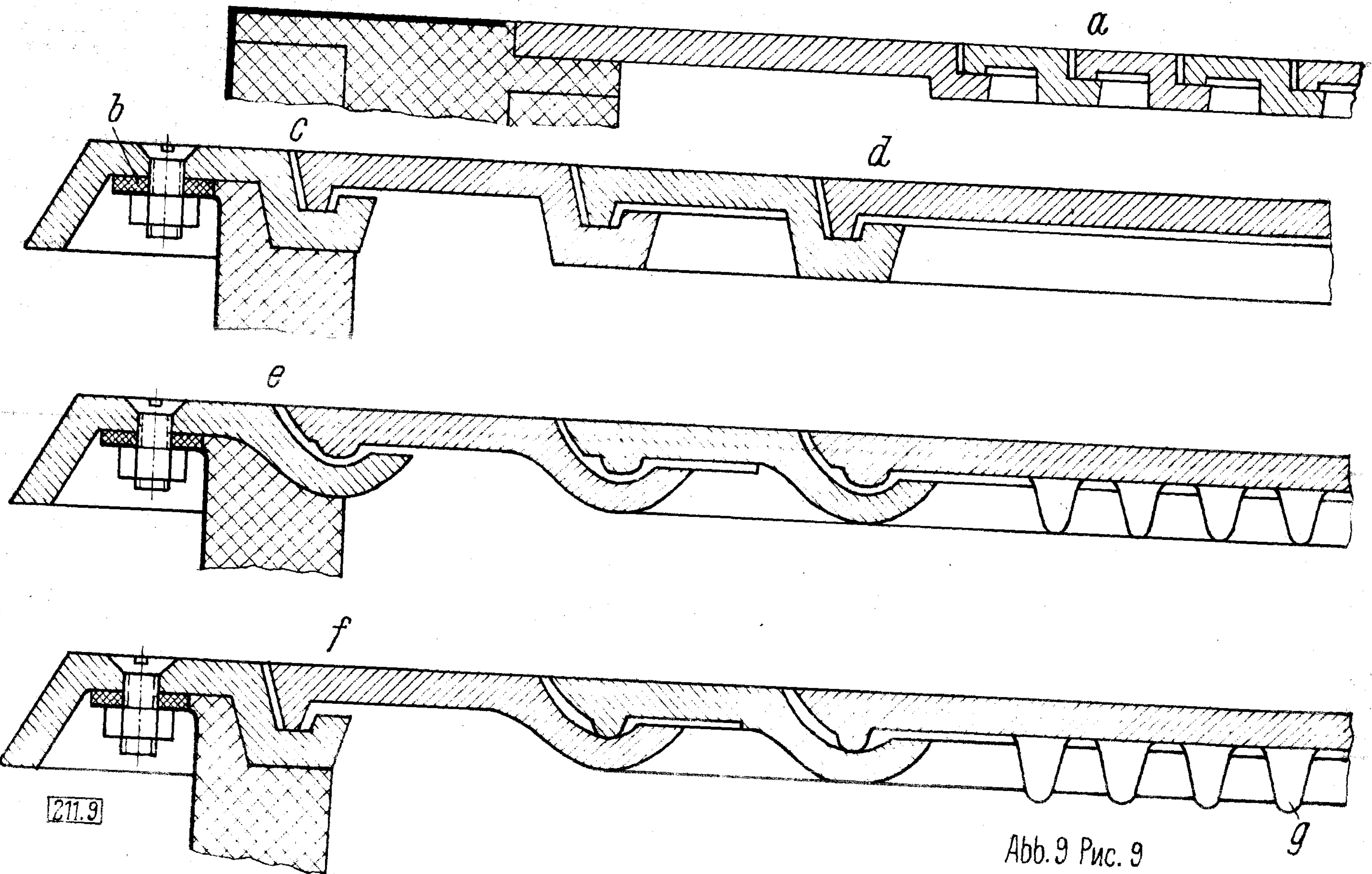


Abb.9 Рис. 9

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

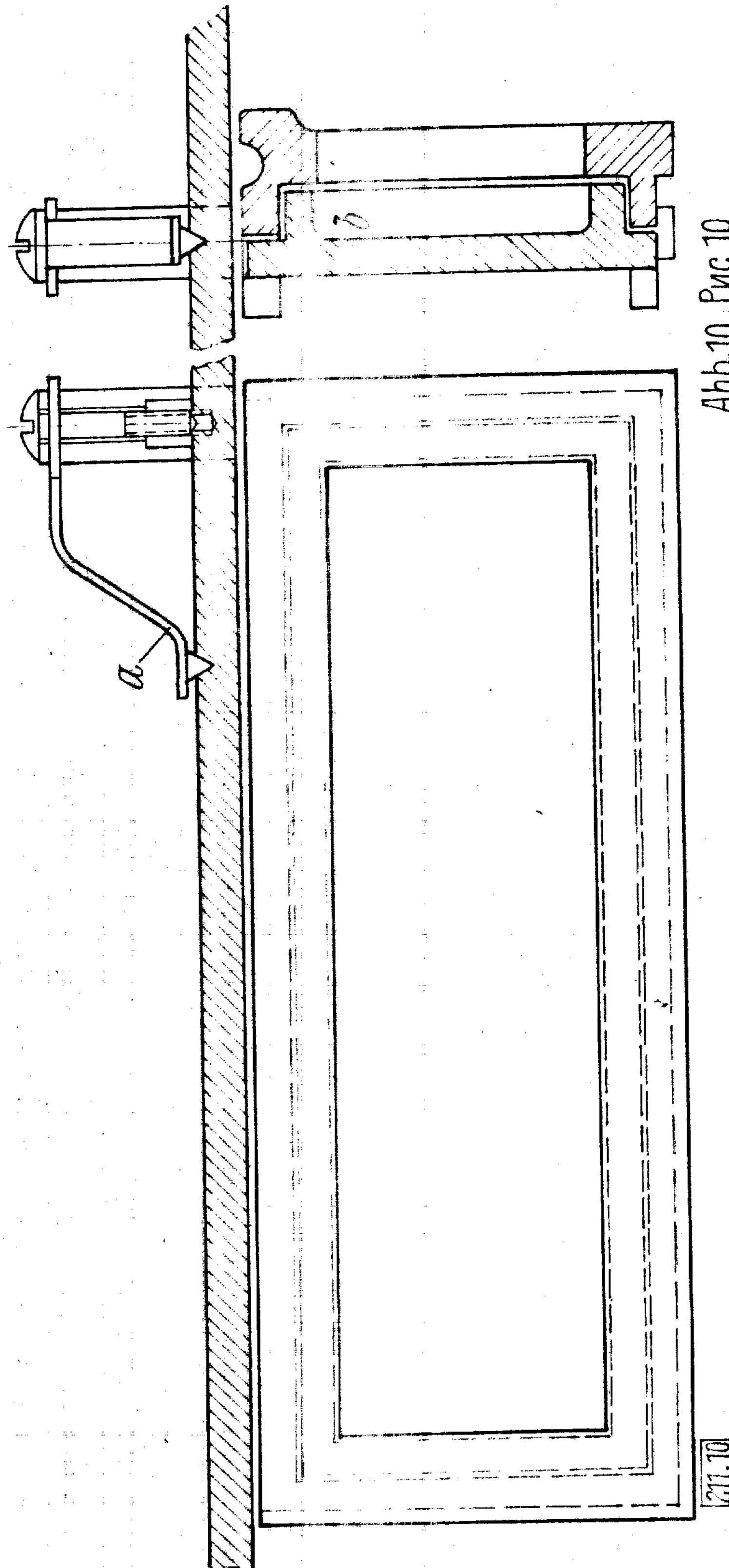


Abb.10 Рис.10

a

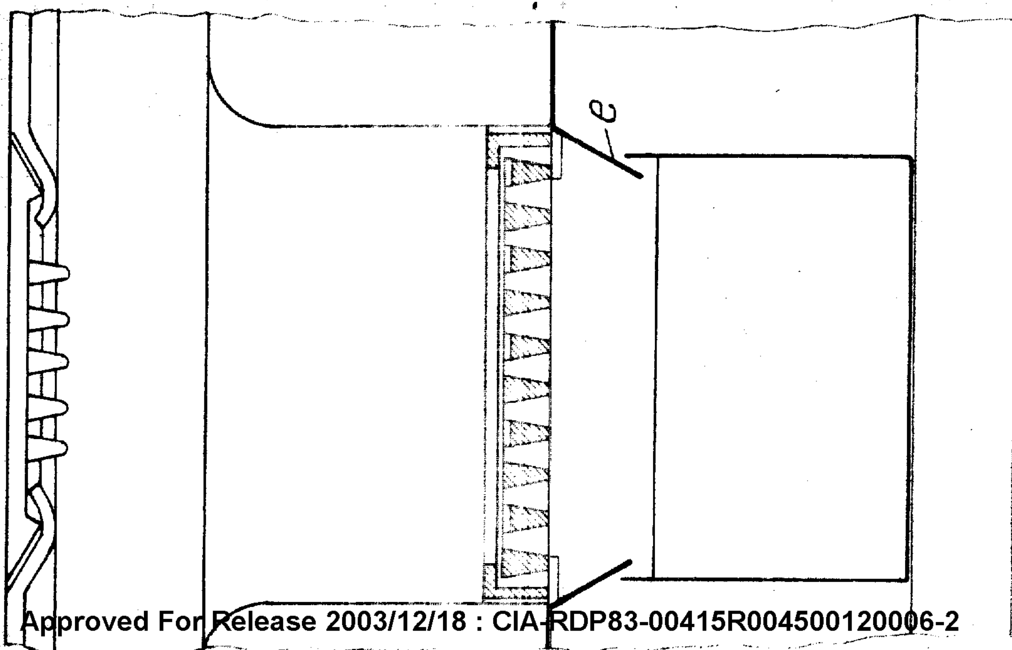
b

c

d

e

Abb.11 Рис.11



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

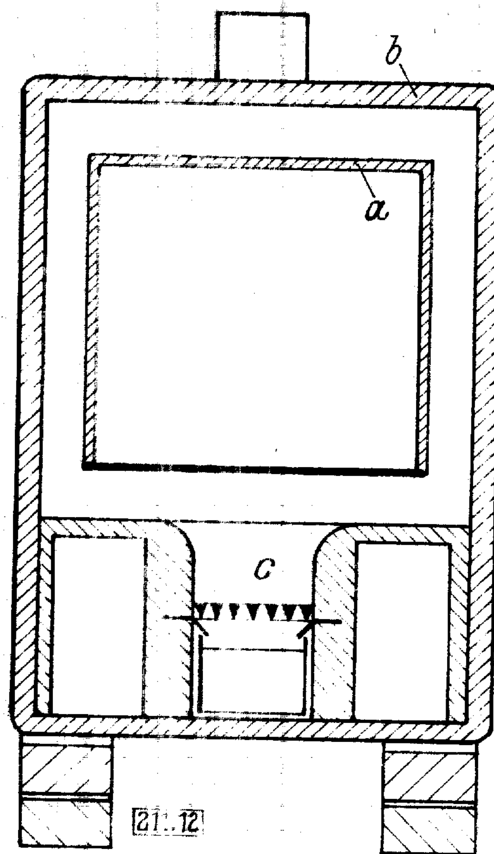
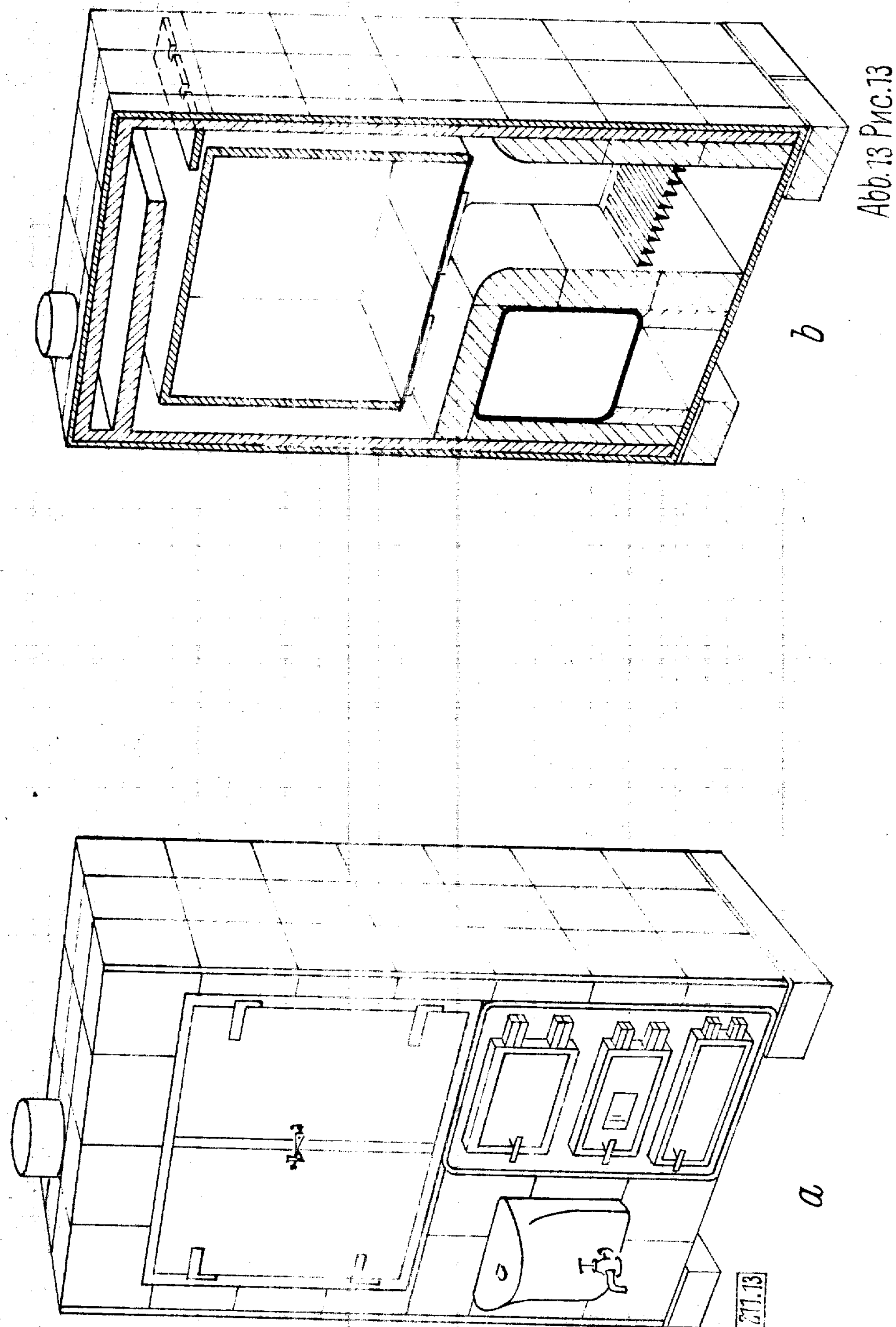


Abb.12 Рис.12



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

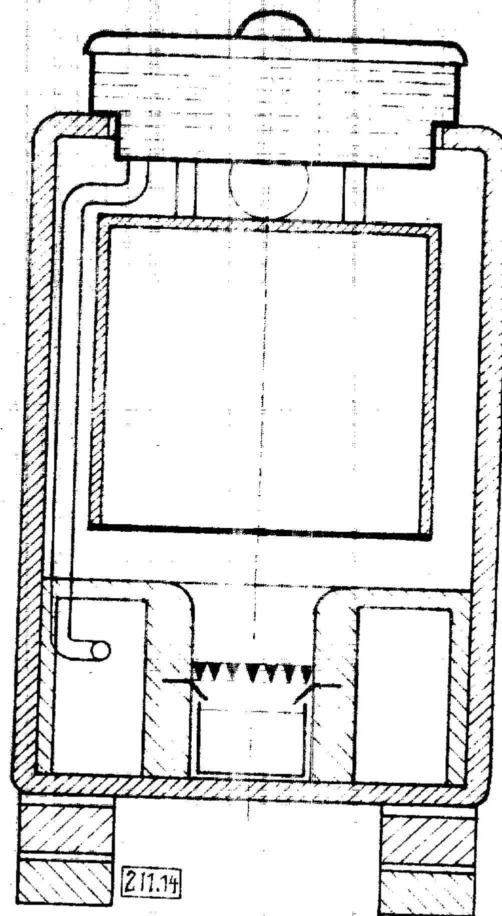
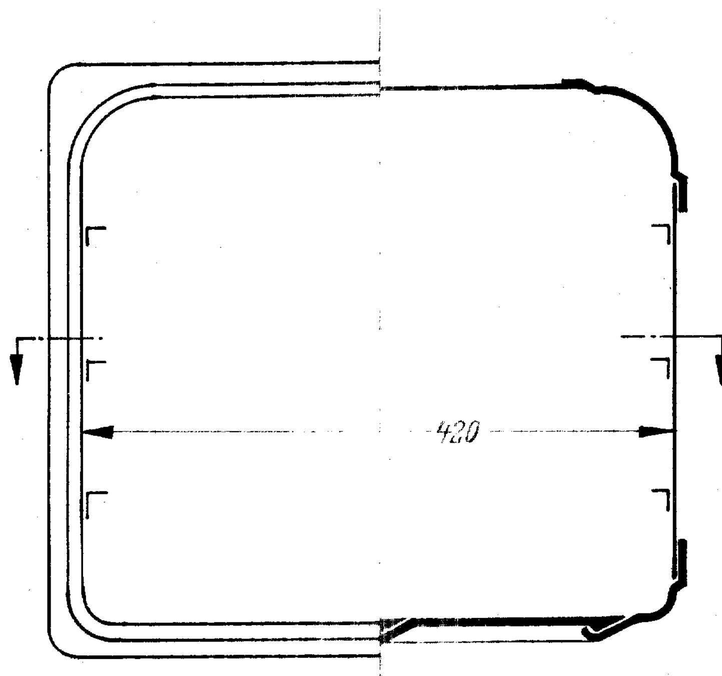


Abb.14 Рис.14



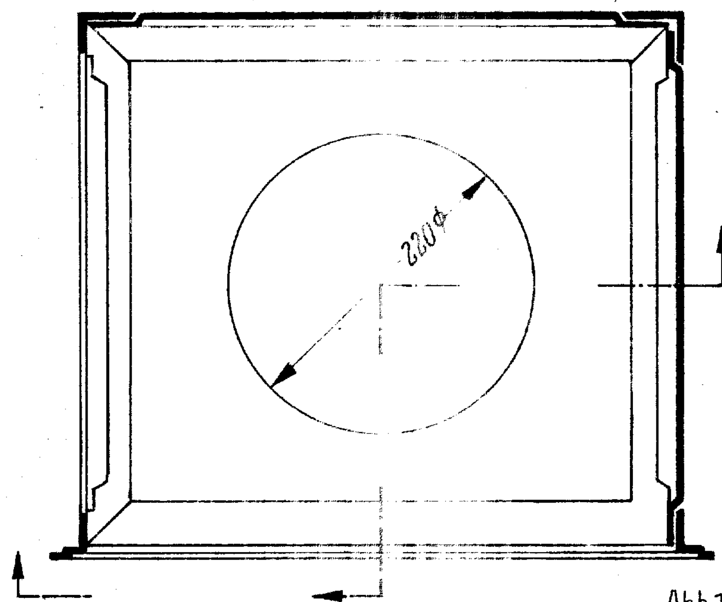
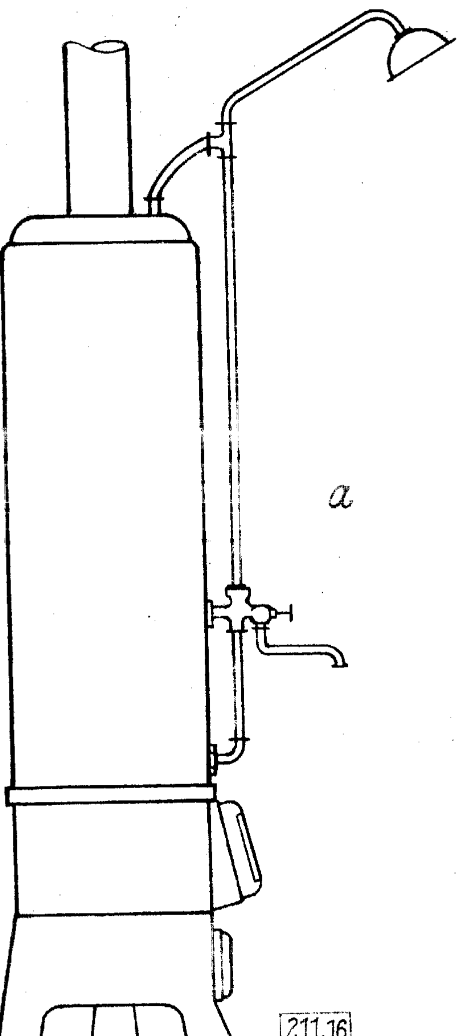


Abb.15 Рис.15



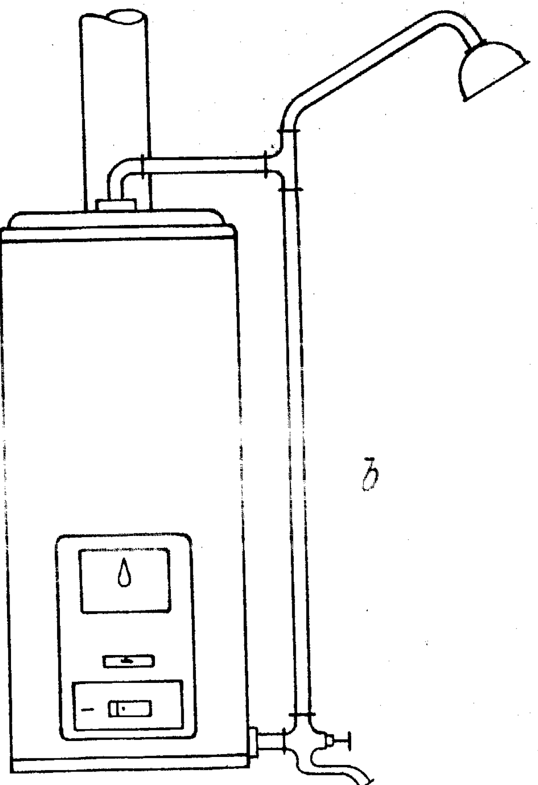


Abb.16 Рис.16

d a b c e

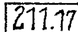


Abb.17 Рис.17

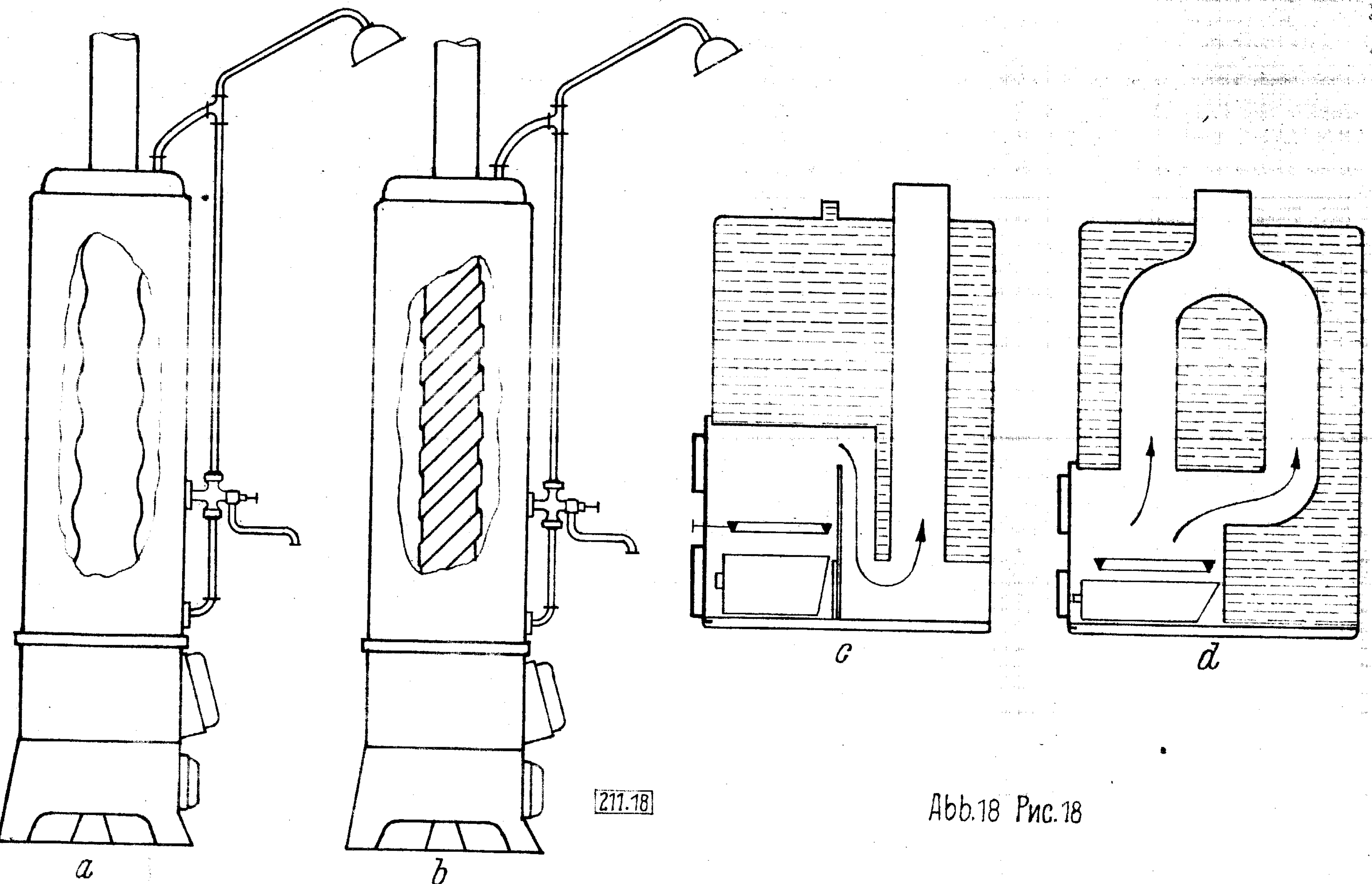
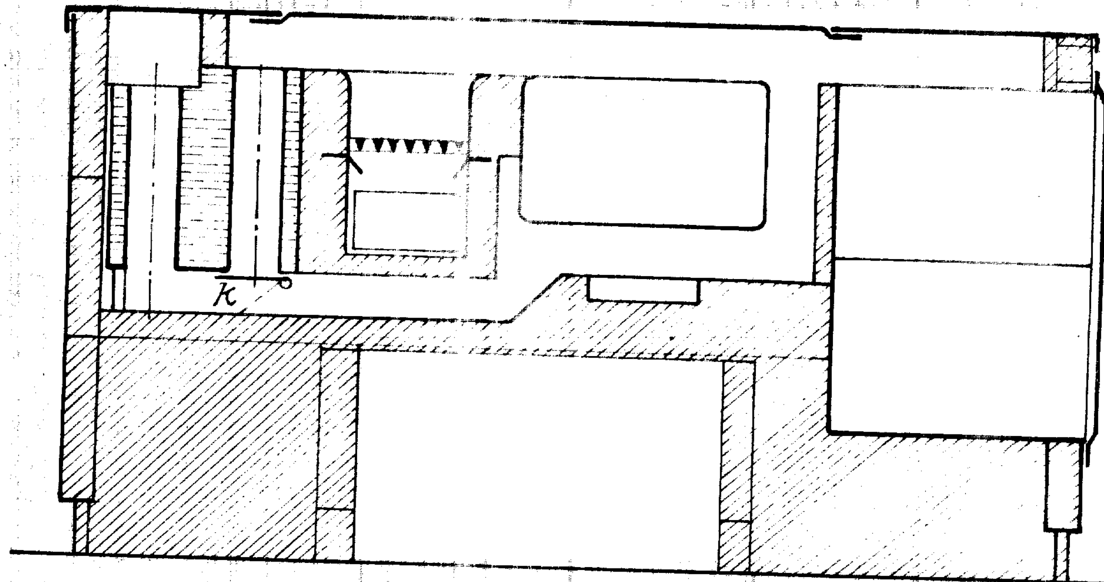


Abb.18 Рис.18



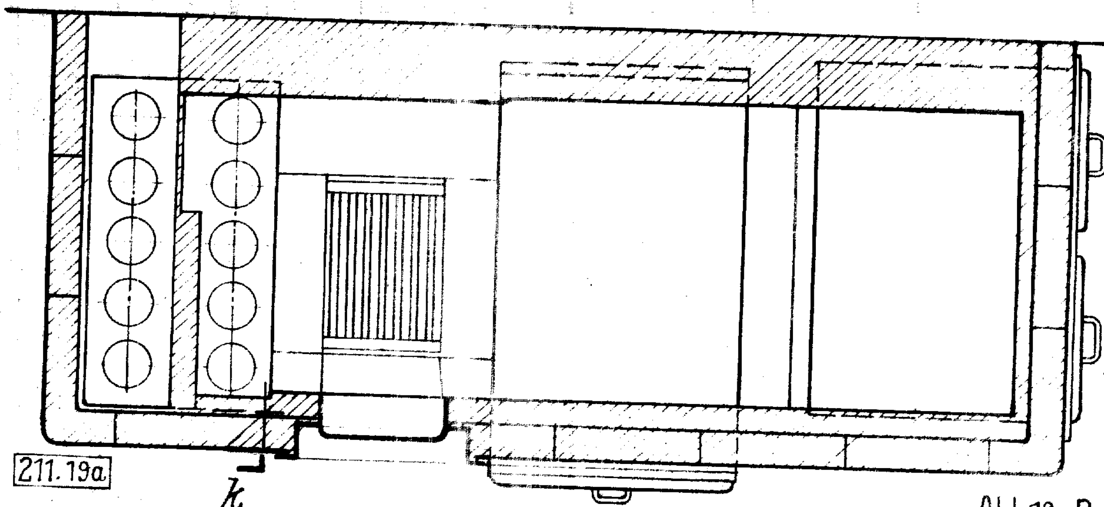
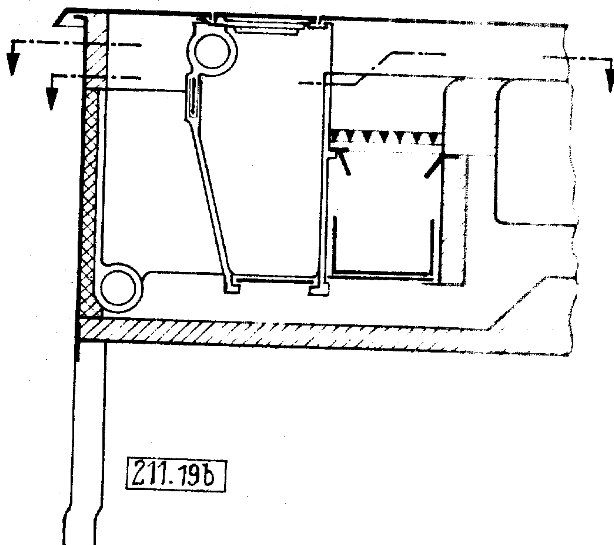


Abb.19a Рис.19a



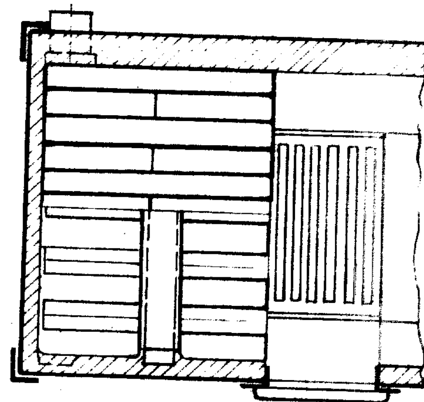
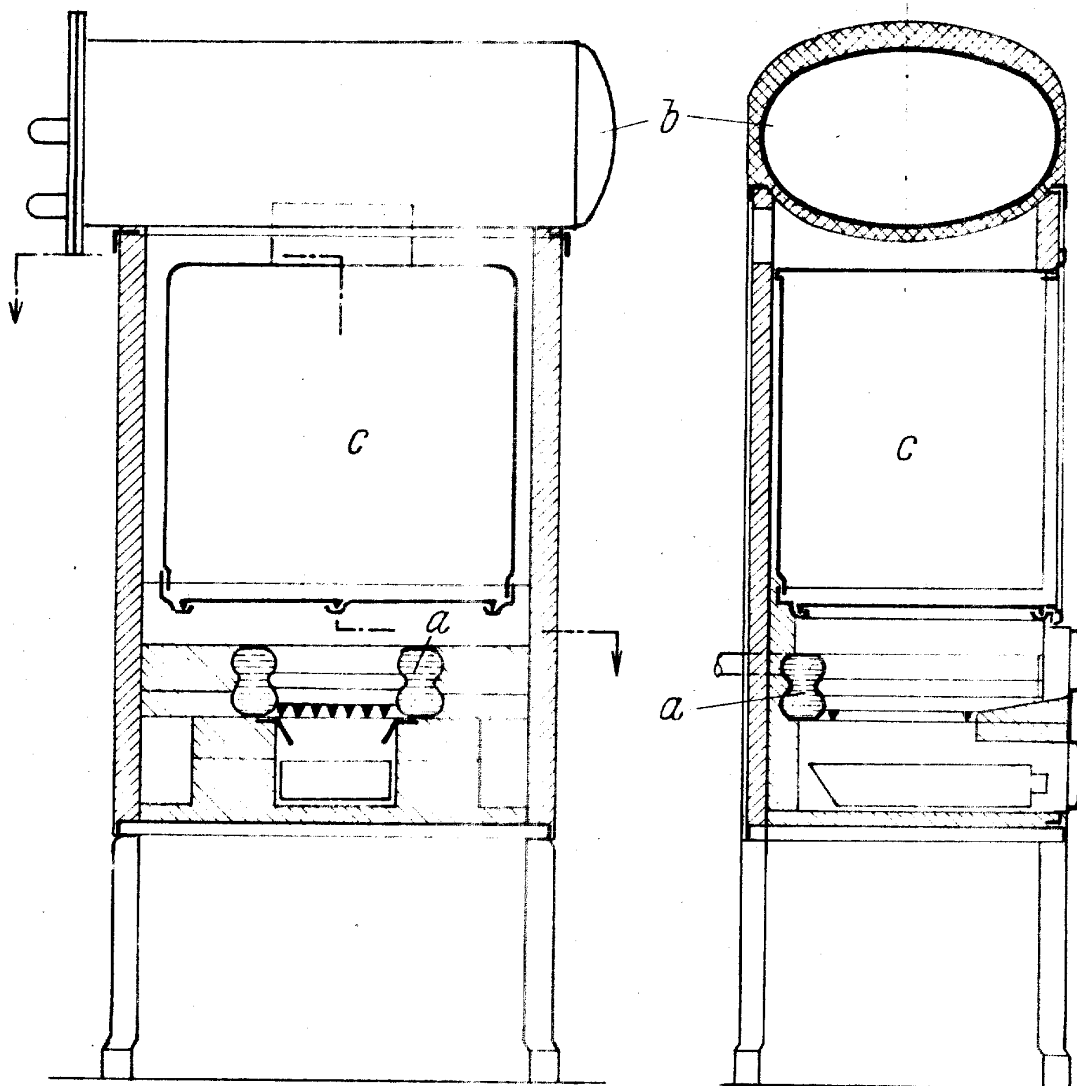


Abb. 19b Рис.19b



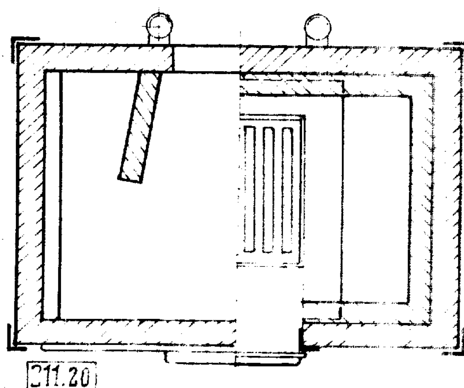


Abb.20 Рис.20

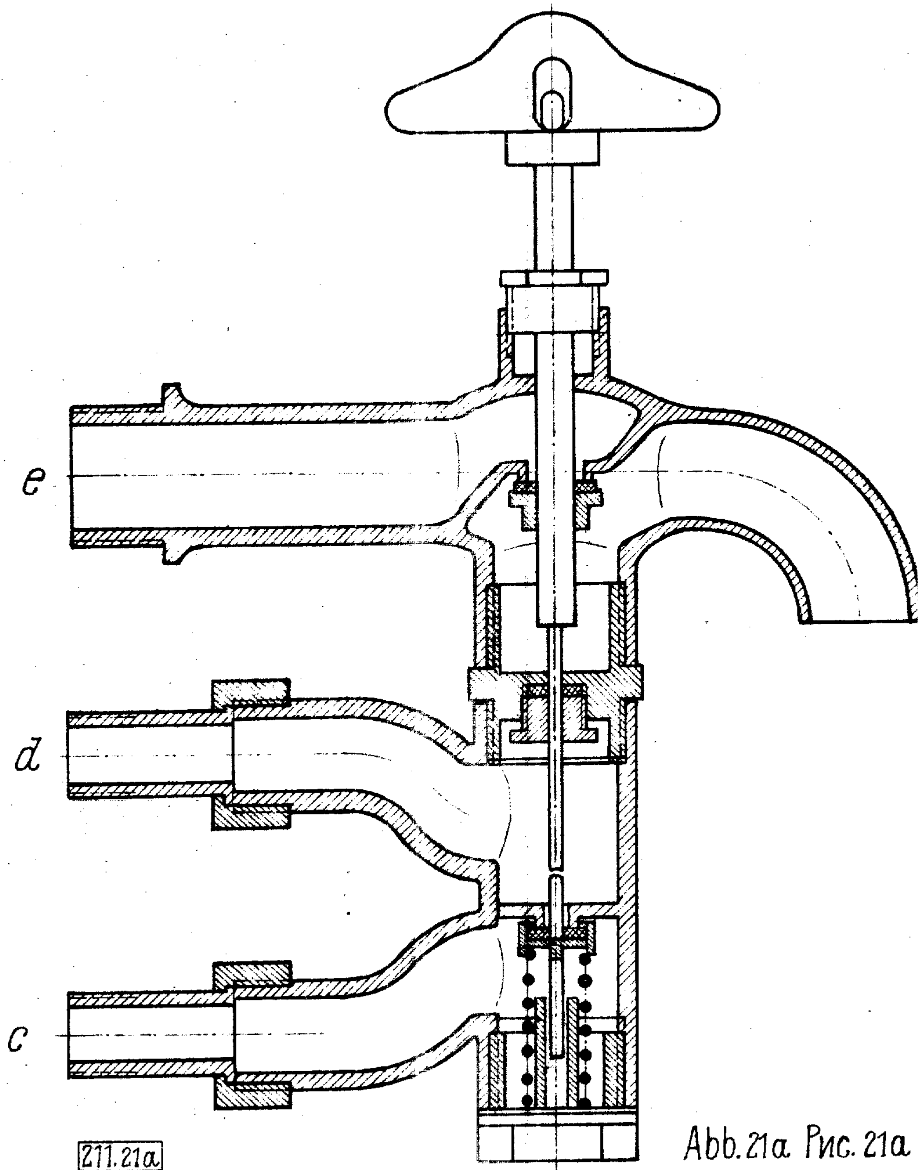


Abb.21a Рис. 21a

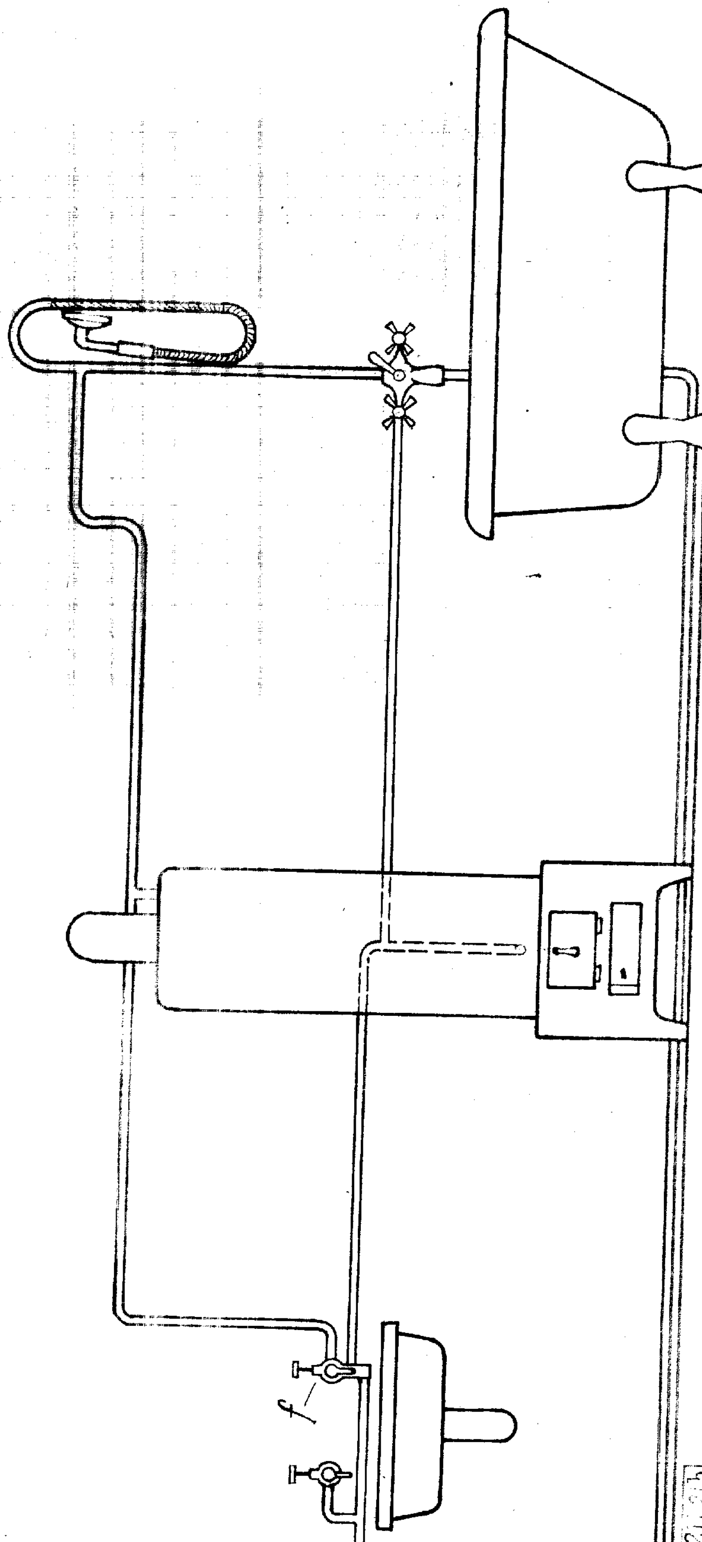
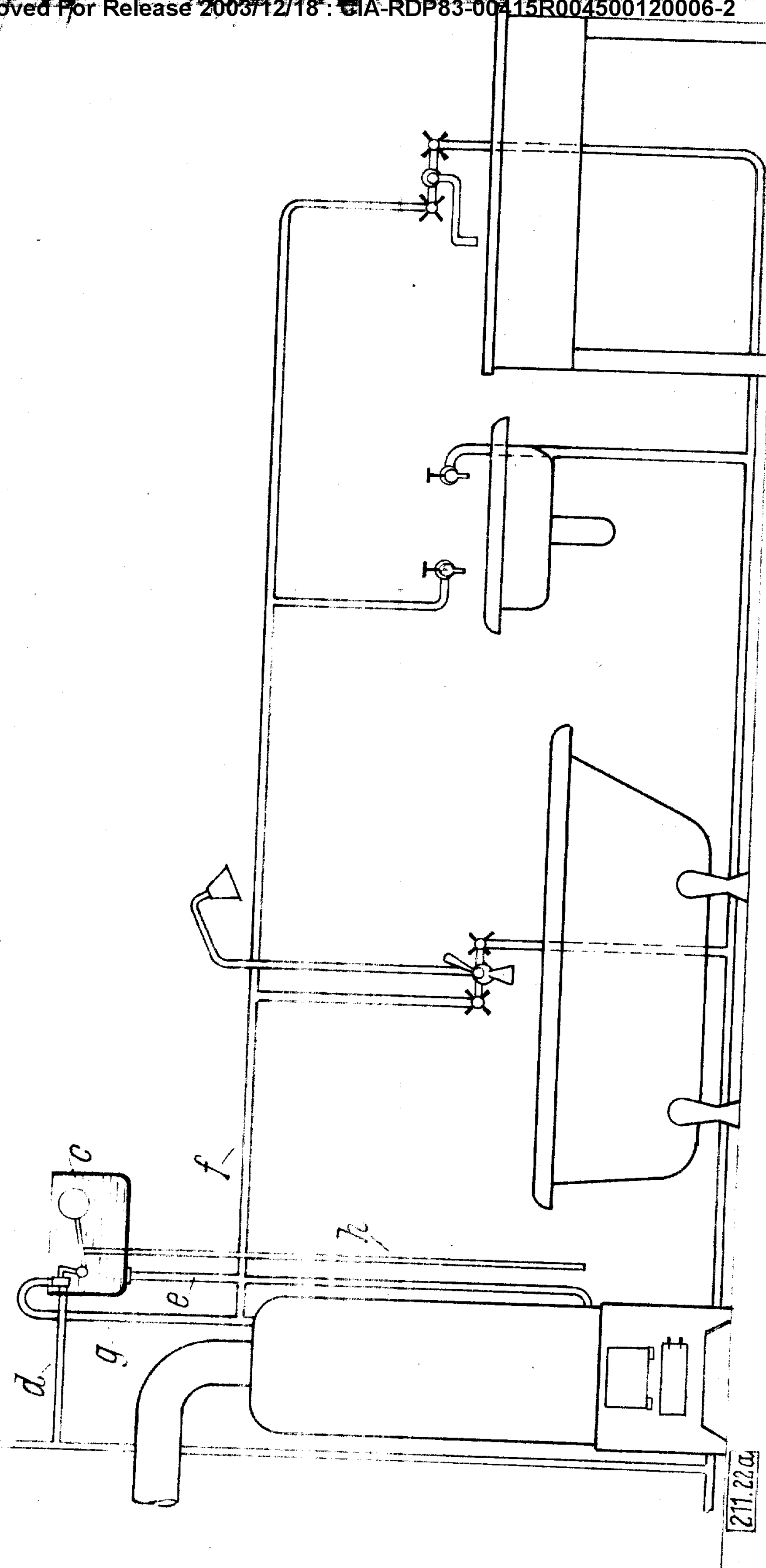


Abb. 21b Рис. 21b


Abb.22a. Рис.22a
c
d
e
f
g
h
211.22a

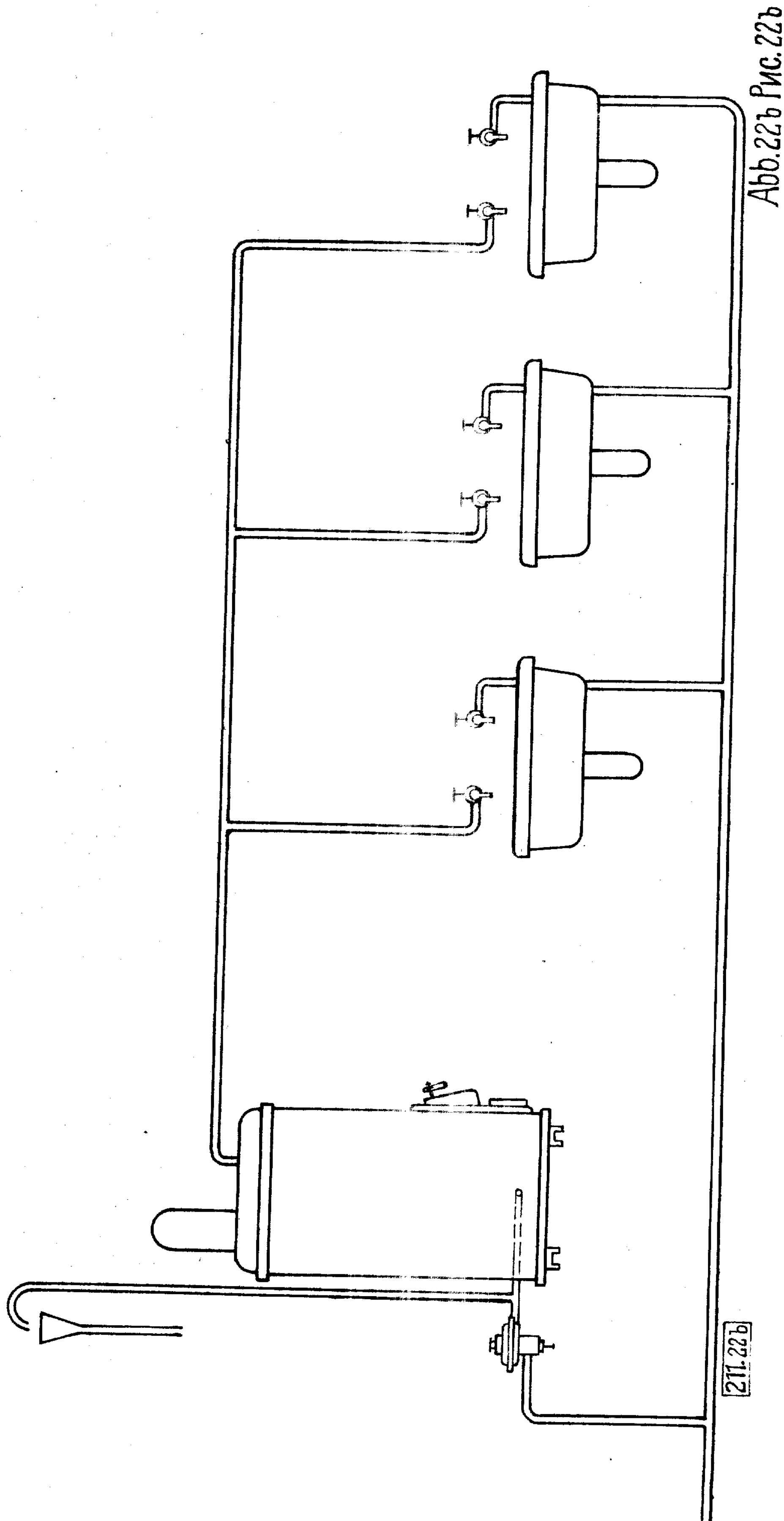


Abb.22b Рис.22b

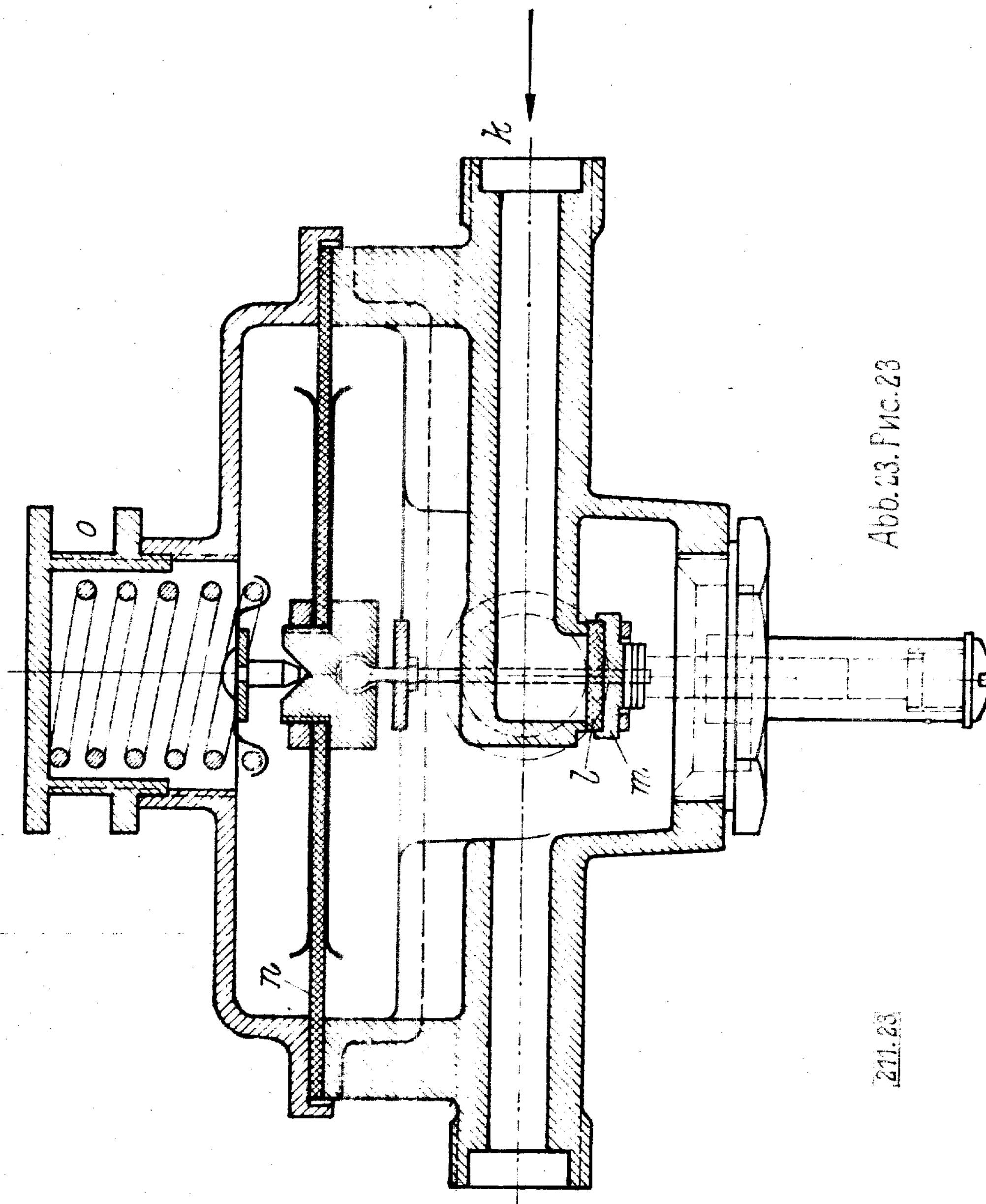
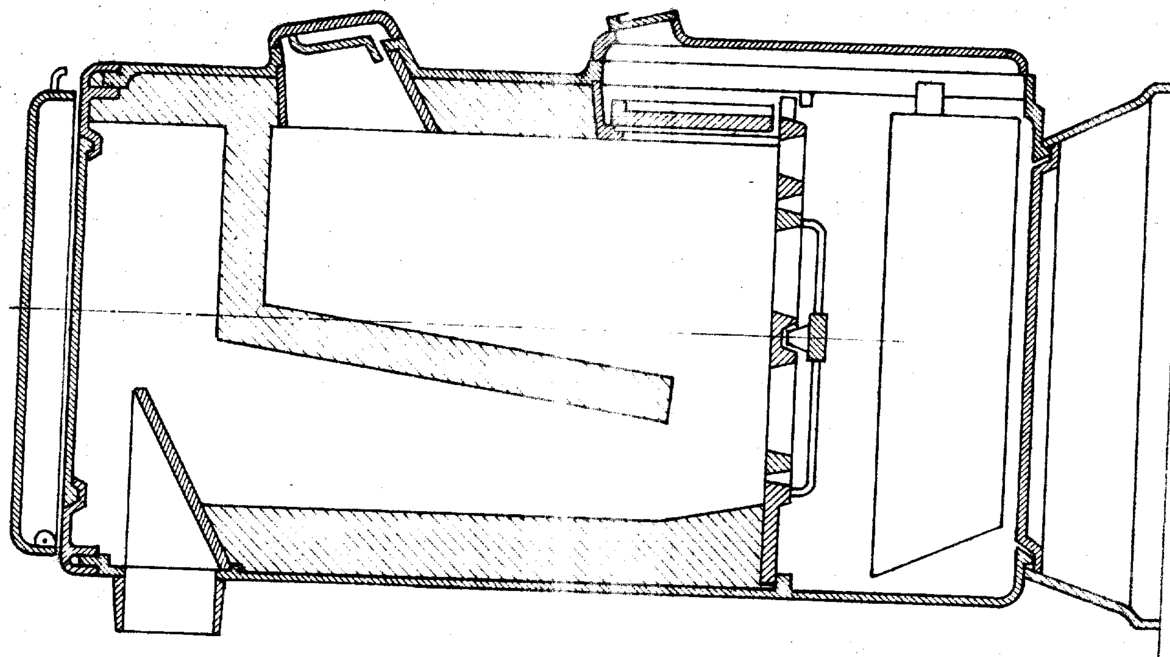


Abb.23. Рис.23

211.23



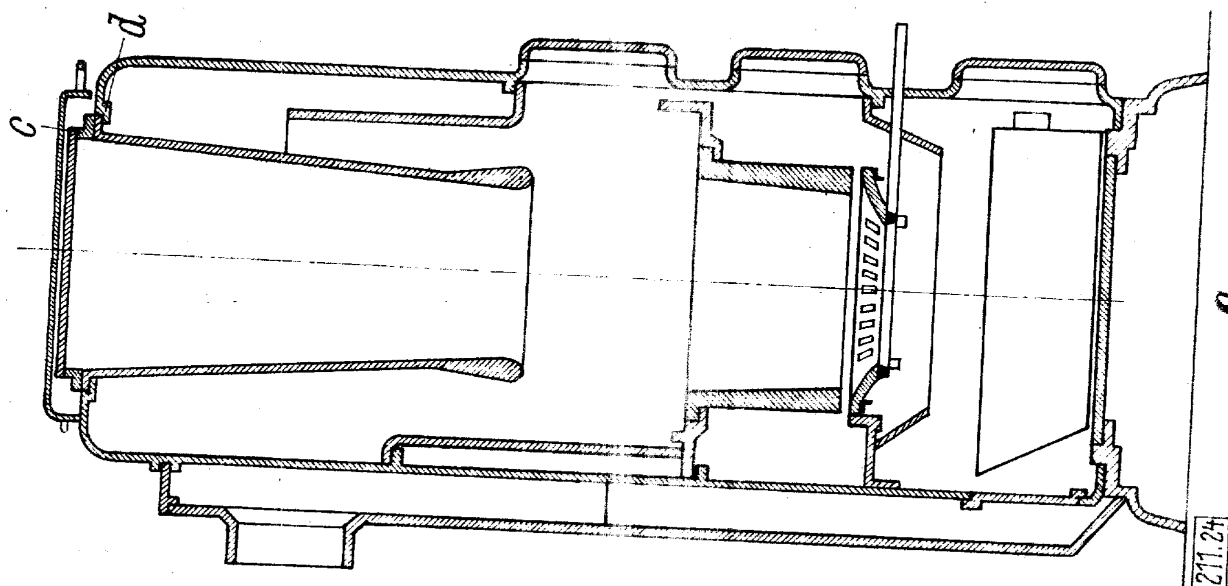
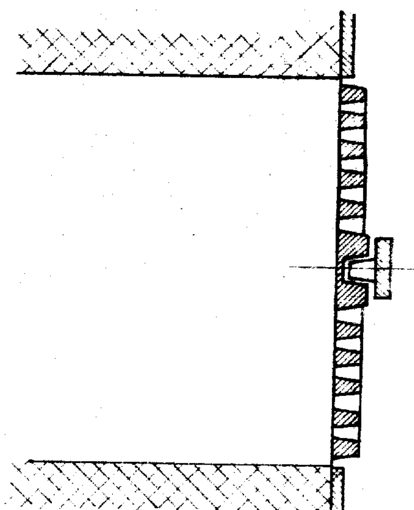
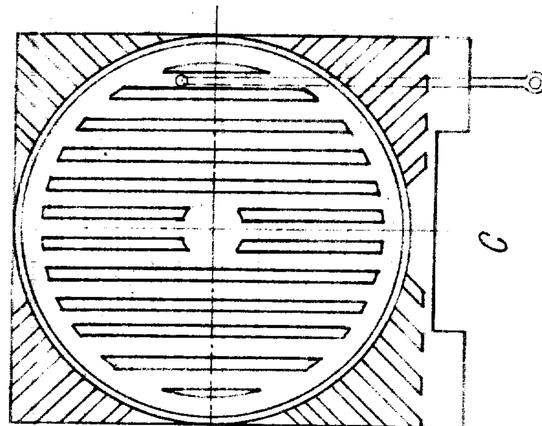


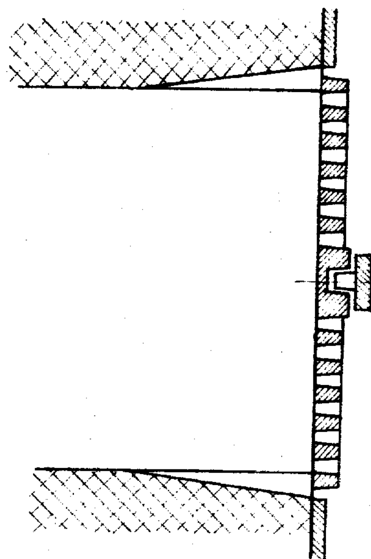
Abb. 24 Рис. 24

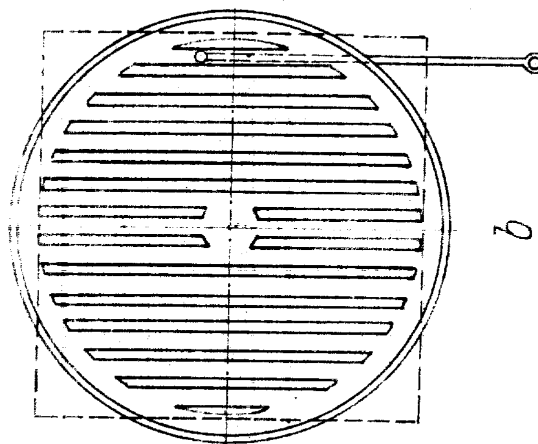
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

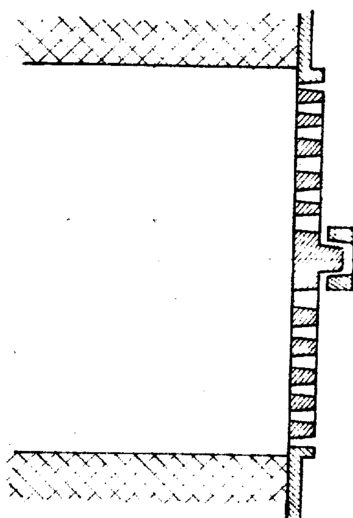
Abb.25 Рис.25

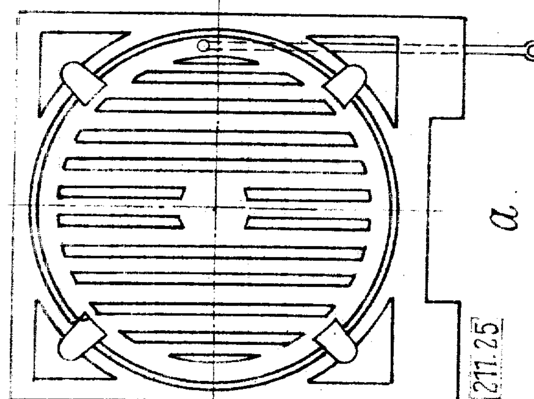












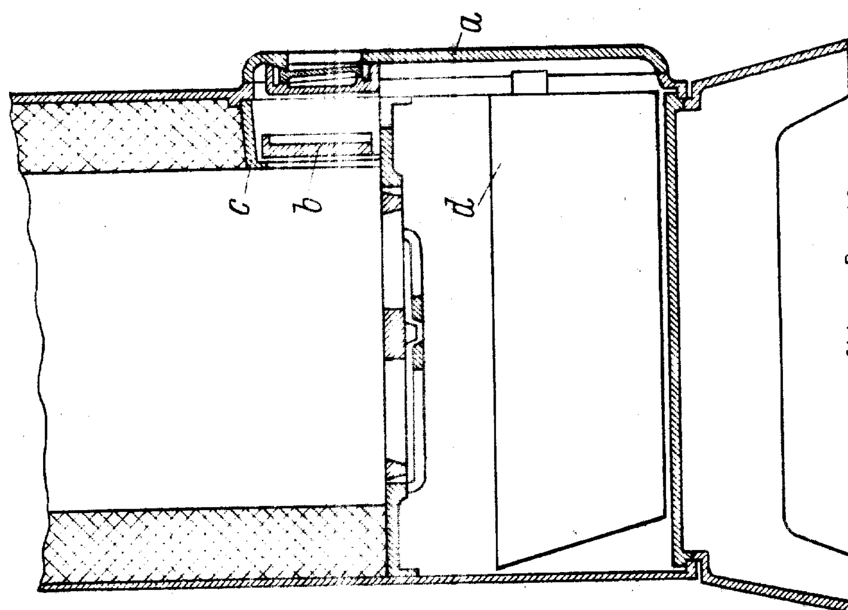


Abb.26. Рис.26

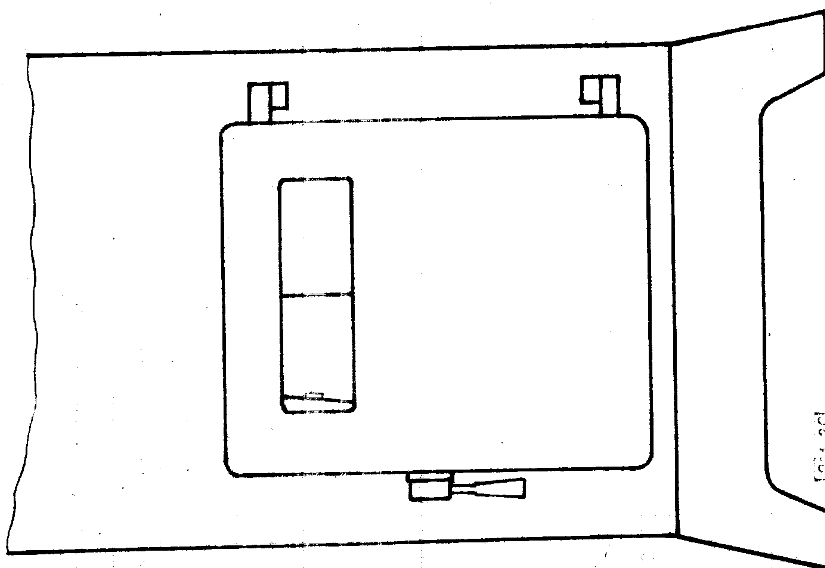
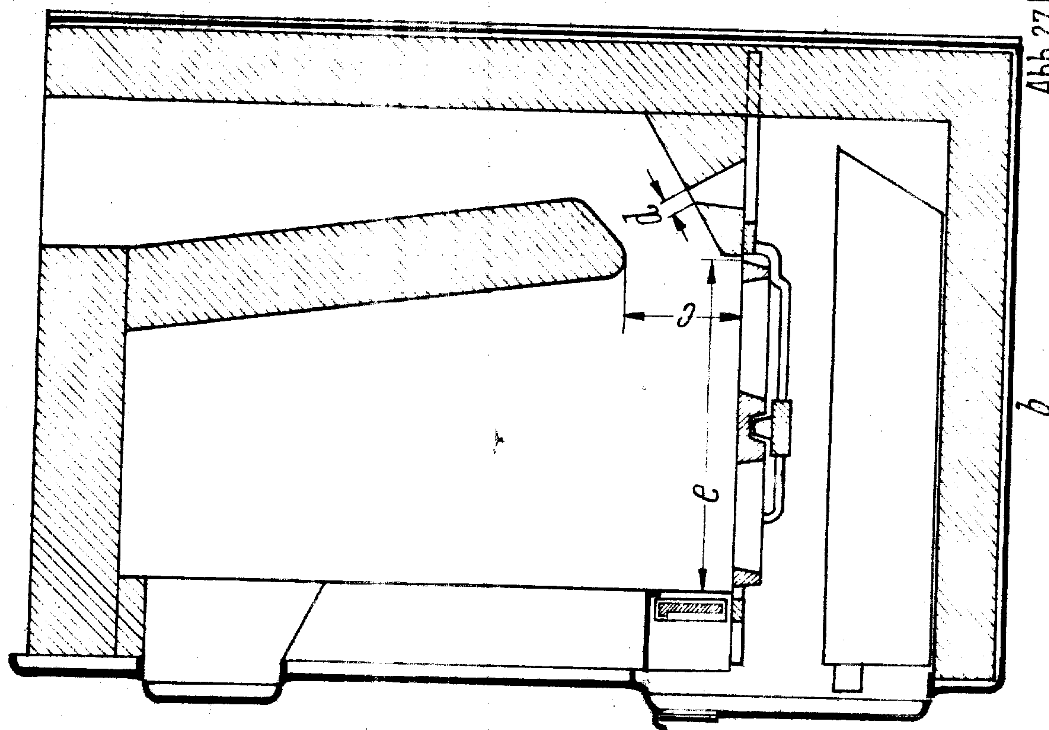
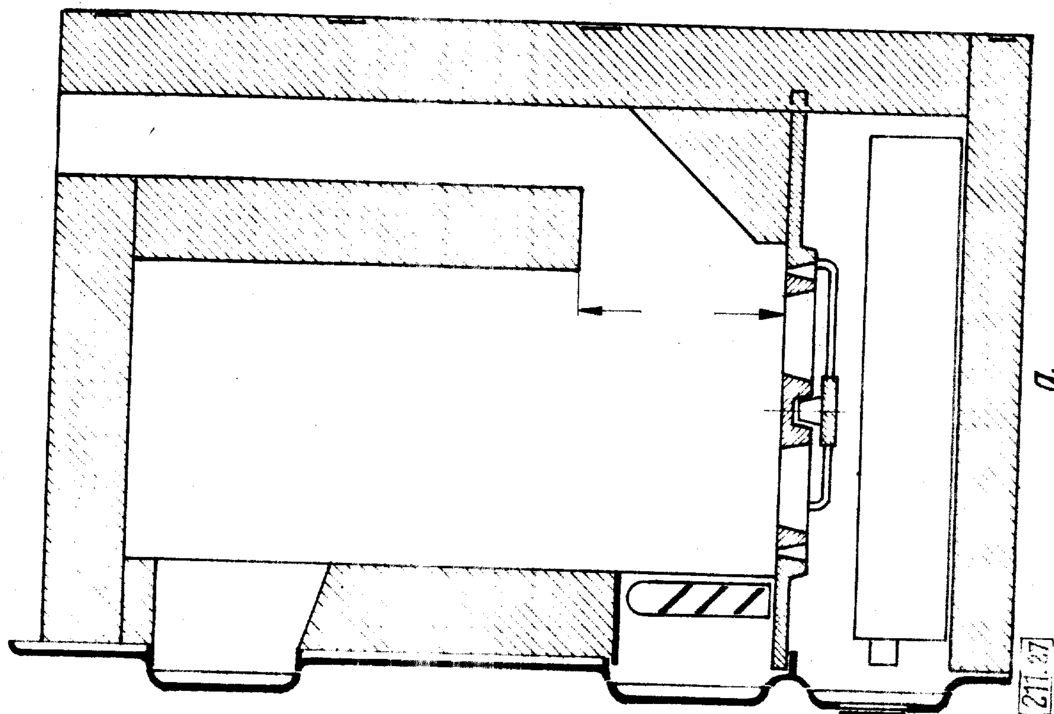


Abb.27 Рис.27





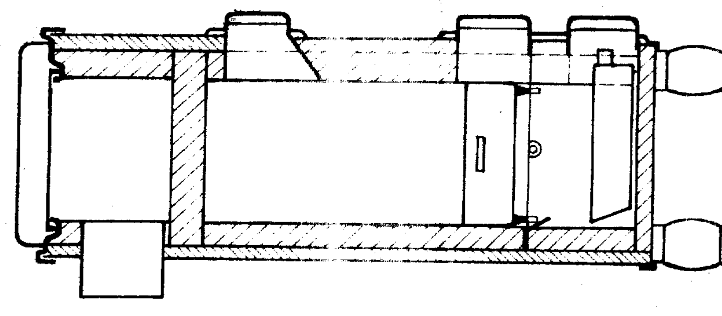
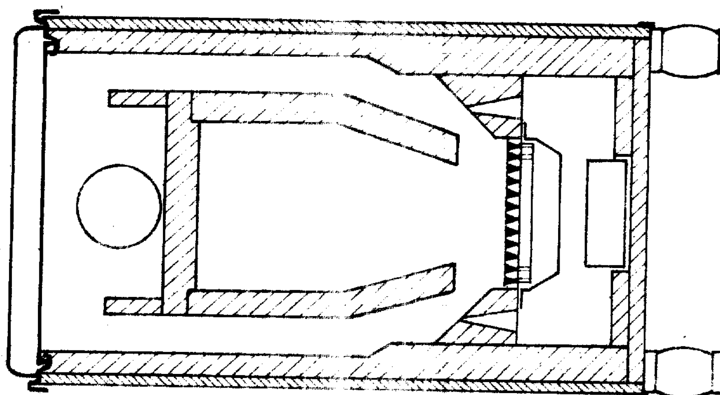


Abb.28. Рис.28



Stellungnahme zu dem Bericht
Nr. 310 IB/2e von Dr. J. Ratzke: Messung von Klopfschwingungen

Der Bericht gibt einen klaren Überblick über die heute zur Verfügung stehenden Klopfmeßgeräte, wobei auch besonders auf die Verfahren zur Klopfuntersuchung an Mehrzylinder-Motoren eingegangen ist.

Diesen Verfahren kommt im Hinblick auf die unterschiedliche Bewertung der Kraftstoffe im Einzylinderprüfmotor und im Mehrzylindermotor erhöhte Bedeutung zu. Erlauben sie doch das Verhalten der verschiedenen Motorenarten den Kraftstoffen gegenüber auf dem Prüfstand und, was wichtig ist, auch im praktischen Betrieb auf der Straße zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse tragen bei der Weiterentwicklung zur Angleichung von Motor und Kraftstoff bei.

gez. Dr. Schmidt

Inhaltsangabe

In der Arbeit werden zuerst die verschiedenen, auch zum Aufzeichnen von Klopfschwingungen geeigneten Arten von Indikatoren zur stetigen Aufnahme des pv-Diagramms aufgeführt und hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeit und Arbeitsweise beurteilt. Nach Berücksichtigung des ersten Klopfanzeigemeßgerätes, des Springstab-Indikators, werden die in der Hauptsache verwendeten Klopfanzeigegeräte, das sind der Piezoquarz-Druckindikator und die induktiven Aufnahmegeräte, auf die Brauchbarkeit für Klopfschwingungsmessungen untersucht.

Die Verfahren zum Messen der ersten und zweiten Ableitung des Druckes werden angeführt, und die Klopfmeßverfahren, bei welchen sich beim Übergang von der normalen zur klopfenden Verbrennung im Verdichtungsdiagramm ein deutlicher Knick ausprägt, als die aussichtsreichsten Klopfanzeige-Meßgeräte genauer berücksichtigt. Es werden die Verfahren zum Aufzeichnen des d^2p/dt^2-Diagramms und die Zylindertemperatur-Messungen mittels Meßstopfens näher erörtert.

Zum Schluß angeführt werden Klopfmeßverfahren für Motoruntersuchungen im Betriebszustand, z.B. beim Kraftfahrzeugmotor während der Fahrt, bei welchen an Serienmotoren keinerlei Änderungen vorgenommen werden müssen. Bei diesen Verfahren können nicht die beim Klopfen auftretenden Gasschwingungen selbst, sondern nur die dadurch angeregten Schwingungen von Motorenbauteilen als Schwingungsgröße, insbesondere als Beschleunigungsstoß, erfaßt werden. Das für diese Zwecke entwickelte akustische Meßverfahren und induktive oder trägerfrequenz-modulierte Aufnahmeverfahren werden beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

- - -

Indikatoren

Allgemeine Gesichtspunkte

Für die Weiterentwicklung der Verbrennungskraftmaschine ist die genaue Erforschung sowie die Kenntnis des Druckverlaufes im Zylinder, in den Ansaug-, Auspuff- und Kraftstoffleitungen notwendig. Für die Untersuchung der motorischen Eigenschaften neuer Kraftstoffe werden Klopfmessungen am Einzylinder-Prüfmotor oder an Mehrzylinder-Motoren im Betriebszustand selbst durchgeführt. Für beide Messungen sind die meßtechnischen Hilfsmittel im wesentlichen die gleichen, so daß hier zuerst die Geräte zur Aufnahme des Druckes angeführt werden sollen. Die Schwierigkeiten bei der Messung des Zylinderdruckes bei den schnellaufenden Motoren liegen hauptsächlich darin, daß das Meßgerät nicht trägheitslos ist und infolgedessen mit einer gewissen Verzögerung anzeigt.

Da in dieser Arbeit Klopfmessungen behandelt werden sollen, werden die Druckmeßgeräte zur Aufnahme von mittleren Druck-Zeit-Diagrammen, bei denen aus den einzelnen Arbeitsspielen jeweils verschiedene Punkte herausgegriffen und aufgezeichnet werden, nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Es sind dies der Punktindikator nach K. J. de Juhasz 1 x), der Fernborough-Indikator 2 , der MIT-Indikator 3 und der Glimmlampen-Indikator der DVL 4 . Mit diesen Geräten und den damit aufgezeichneten Mittelwert-Diagrammen von verschiedenen Arbeitstakten werden vor allem Untersuchungen über indizierte Mittelwertsdrücke und die Ermittlung des Exponenten der thermodynamischen Kenngröße unter den verschiedensten Betriebsbedingungen durchgeführt. Für die Erforschung des Verbrennungsvorganges, der Klopfgrenze und zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der einzelnen Arbeitsspiele müssen Indikatoren verwendet werden, welche die Diagramme der einzelnen Arbeitstakte gesondert aufzeichnen.

---

x) Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß des Berichtes.

Von den in der Meßtechnik allgemein verwendeten Verfahren, das sind das piezo-elektrische, induktive, kapazitive, magneto-elastische und das Halbleiter-Verfahren, sind alle zum Bau von Indikatoren und zur Aufzeichnung des wechselnden Gasdrukkes im Brennraum verwendet worden. Das magneto-elastische und das Halbleiterverfahren sind aber nach einigen Anfangsversuchen infolge der großen Temperaturabhängigkeit einerseits und der Stoßempfindlichkeit andererseits nicht weiterentwickelt

Abb. 1 worden. Abb. 1 zeigt die Kohle-Druckmeßkammer nach Glamann und Triebnigg 5 . Die Wirkungsweise ist aus der Zeichnung zu ersehen. Die Eigenfrequenz ist aber infolge des dabei verwendeten Zwischengliedes sehr niedrig, so daß nur langsam verlaufende Vorgänge mit diesem Gerät untersucht werden können.

Piezo-elektrische Meßgeräte

Insbesondere das piezo-elektrische Verfahren wurde von den verschiedenen Forschungsstellen zum Bau von Indikatoren herangezogen. Es hat einen sehr hohen Stand der Entwicklung erreicht, da hier am leichtesten die Möglichkeit besteht, eine hohe Eigenfrequenz des Gerätes zu erzielen 6, 7, 8, 9 . Zu diesem Zweck ist die Quarzmeßkammer bei den neueren Bauarten in einer Hülse, welche am besten gleich die Membrane trägt, vorgespannt eingebaut. In der Regel besteht die Quarzmeßkammer aus zwei Quarzscheiben, von denen eine zwecks Durchführung der mittleren Ableitungselektrode durchbohrt ist. Je nach dem Verwendungszweck, d.h. nach der am Gerät auftretenden Temperatur, ist das Gehäuse für Kühlung (Wasser, Luft) eingerichtet.

Bei den mittels Hülse vorgespannten Indikatoren werden, wie Meurer 10 zeigt, etwa 75 % der äußeren Kräfte auf den Meßquarz übertragen, was bei dem mittels Membrane vorgespannten Indikatoren bei weitem nicht der Fall ist. Abb. 2 zeigt

Abb. 2 eine Ausführung kleinster Bauart mit hoher Eigenfrequenz. Be-

sonders ist darauf zu achten, daß die untere Abstützplatte des Meßquarzes spannungslos auf der Membran aufsitzt. Bei der in
Abb. 3 Abb. 3 dargestellten Konstruktion ist ebenfalls eine dünne Abdichtmembran vorhanden, welche nur an den Federungsstellen den Verbrennungsgasen direkt ausgesetzt ist, während der übrige Teil durch eine Abdeckplatte geschützt wird. Da sich bei genauen Messungen herausgestellt hat, daß für je etwa 100° Temperaturzunahme der Elastizitätsmodul des Meßquarzes um etwa 1,8 % abnimmt, ist Wasserkühlung vorgesehen. Bei den Messungen im Zylinderkopf schnellaufender Motoren beträgt die im Meßquarz erzeugte mittlere Energie etwa 10^{-9} Watt. Daher muß eine Verstärkung vorgesehen werden. Da aber jede zum Meßquarz parallel liegende Kapazität die dem Meßdruck entsprechende Ladung Q und somit die Spannungsänderung V schwächt ($V = \frac{Q}{c}$), ist außer einer hohen Isolation auf geringe Kapazität der Meßleitung größter Wert zu legen.

Außerdem ist es zweckmäßig, das Elektrometerrohr, das ist das hoch isolierte Eingangsrohr des Verstärkers, in der Nähe der Meßstelle unterzubringen (ähnlich wie beim Kondensator-Mikrophon). Außerdem müssen die Zuführungskabel gut abgeschirmt
Abb. 4 werden. Abb. 4 gibt die Prinzip-Schaltung eines Verstärkers wieder. Der Übersichtlichkeit wegen ist die Schaltung so gezeichnet, als ob alle Spannungen von Batterien entnommen würden. Bei neuzeitlichen Geräten werden sie (siehe Abb. 24, 25) selbstverständlich aus den Starkstrom-Netzspannern entnommen. Die Empfindlichkeit wird in der Regel mit Hilfe von Kapazitäten eingestellt, die parallel zum Meßquarz liegen. Der Ausgang ist zum Anschluß sowohl für ein Kathodenstrahlrohr als auch für einen Schleifen-Oszillographen vorgesehen. Da beim Schleifen-Oszillographen bei Verwendung der gebräuchlichen Meßschleifen von Siemens & Halske infolge der Dämpfung Nacheilwinkel auftreten, welche zu Verzerrungen des Diagrammes führen, sollen hier die Untersuchungen von L. Bisang 11 ange-
Abb. 5 führt werden. Abb. 5 zeigt die Nacheilwinkel der verschiedenen

Schleifenarten in Abhängigkeit von der Frequenz. Daraus ist zu ersehen, daß bis zu einem Verhältnis der aufgezeichneten Frequenz zur Eigenfrequenz von etwa 0,3 die Verzögerung konstant ist, d.h. die Nacheilung in Grad Kurbelwinkel nimmt mit der Drehzahl proportional zu. Für eine Schleife Type V von Siemens & Halske, welche die geringste Verstärkung benötigt, ist bei 3000 U/min bereits eine Verzögerung von 6° Kurbelwinkel in der Grundwelle vorhanden. Bei Type I dagegen beträgt sie nur 0,6°.

Abb. 6 Abb. 6 gibt die Verzerrung bei den einzelnen Schleifentypen gegenüber der Aufzeichnung mit Kathodenstrahl-Oszillographen wieder. Eine Korrektur ist daher im Zeitpunkt der Zündung und bei unstetigem Verlauf des Drucks notwendig.

Beim Kathodenstrahl-Oszillographen, welcher für die während der Verbrennung auftretenden Schwingungen als trägheitslos anzusehen ist, kann die notwendige Leistungsverstärkung mit wesentlich einfacheren Mitteln erreicht werden. Wird das zweite Plattenpaar von einer mit dem Kolbenweg proportionalen Spannung gesteuert, so kann direkt das pv-Diagramm aufgenommen werden. Bei Verwendung von Mehrschleifen-Oszillographen lassen sich leicht die notwendigen Zuordnungspunkte, das sind Totpunkte, Einspritzdrücke, Nadelbewegung usw. gleichzeitig aufnehmen.

Die Eichung kann bei guter Isolation statisch durchgeführt werden. Eine absolute Aufzeichnung der Null-Linie ist aber nicht möglich; doch sind meistens Entladeschalter für den Meßquarz vorgesehen, damit man jederzeit eine Bezugslinie herstellen kann. Bestimmte Eichausschläge, durch angelegte Spannungen bewirkt, ermöglichen jederzeit die Kontrolle des Verstärkungsfaktors der Anlage. Mit Hilfe der einmal aufgestellten Zuordnung zwischen statischem Druck und Eichausschlag läßt sich dann der Druckmaßstab auch bei etwa auftretender Änderung der Anoden- und Heizspannung festlegen. Der Meßbereich des Indikators selbst kann, wie bereits erwähnt, durch Parallelkapazitäten verschieden eingestellt werden.

Induktive Meßgeräte

Von den induktiv arbeitenden Geräten, bei welchen sich eine Meßmembran einer Drosselspule mehr oder weniger nähert und infolge der Änderungen des Luftspalts der induktive Widerstand
Abb. 7 verändert wird, zeigt Abb. 7 ein Beispiel. Bei dieser Ausführungsform muß die Wärme von der Spule ferngehalten werden. Daher ist ein Übertragungsglied zwischen Indikatorkolben und Hauptmembran vorgesehen. Dadurch ist die Eigenschwingungszahl wieder verhältnismäßig niedrig, so daß nur langsam verlaufende Vorgänge untersucht werden können. Das Gerät wird mit Wechselspannung höherer Frequenz erregt und moduliert betrieben.

Vom Verfasser selbst wurde ein anderer induktiver Indika-
Abb. 8, 9 tor nach Abb. 8 entwickelt [18]. Abb. 9 zeigt die Schnitt-Skizze. Um einen einfachen Aufbau zu ermöglichen, wurde das Gerät in zwei Teilen ausgeführt. Der mechanische Teil besteht aus dem Gehäuse 1, der Membran 2 und dem Tauchanker 3. Der elektrische Teil gliedert sich in die Doppeldrossel 5 mit den Ableitungen 8, dem Spulenkörper 6 und der Spulenhalterung 7, mit der beide Teile fest verschraubt werden. Die Abmessungen werden so gewählt, daß das Gerät in den normalen Zündkerzenbohrungen von 18 und 14 mm Durchmesser untergebracht werden kann.

Für die Membran, welche aus später noch ausgeführten Gründen aus unmagnetischem Material bestehen muß, wurde Chrom-Nickel-Stahl gewählt. Der Tauchanker, welcher sich zwischen den beiden Spulen zentrisch hin und her bewegt, besteht aus Weicheisen und ist mit dem Membranfortsatz hart verlötet. Der Spulenkörper wird am zweckmäßigsten aus Porzellan oder Steatit hergestellt, um die auftretenden Temperaturen je nach Kühlung von etwa 200 bis 250° auszuhalten. Ebenfalls hat sich für diesen Zweck ein Körper aus eloxiertem Aluminium gut bewährt. Durch den seitlich angebrachten Stutzen s und eine gegenüberliegende Bohrung kann Kühlluft zu- und abgeführt werden.

Die elektrische Doppeldrossel ist auf dem Spulenkörper in zwei gleichen Hälften aus feinem lackisolierten Draht symmetrisch aufgebaut (2 x 3000 Windungen von 005 mm Durchmesser). Damit auch der magnetische Widerstand für beide Spulenhälften gleich wird, ist nur der Mantel des Indikatorgehäuses aus Eisen, während die Membran und die Spulenhalterung - wie bereits angeführt - aus unmagnetischem Material bestehen. Der Tauchanker liegt ebenfalls symmetrisch zu der Spulenmitte und nimmt beiderseitig die im Spulenkern befindliche Bohrung nur zu zwei Dritteln ihrer Länge ein. Dadurch wird erreicht, daß die Eichkurve vollkommen linear ist, da die Spule als unendlich lang angesehen werden kann und sich der magnetische Widerstand linear mit der Eintauchtiefe ändert.

Aus dem gleichen Grunde haben bleibende Durchbiegungen der Membran bei Überbeanspruchungen, soweit sich dadurch die Elastizität der Membran nicht ändert, nur eine Verschiebung des Nullpunktes und keine Empfindlichkeitsänderung zur Folge. Da der Aufbau zentrisch symmetrisch ist, kann ein Schwingen des Tauchankers in radialer Richtung keine Störung verursachen, was sich in der geringen Störempfindlichkeit des Gerätes angenehm bemerkbar macht. Um die Eigenfrequenz noch zu erhöhen und außerdem die Empfindlichkeit zu steigern, ist es zweckmäßig, den Körper selbst mit der Membran aus unmagnetischem Material herzustellen und die magnetische Rückführung an der Spule direkt durch eine Hülle aus weichem Eisen durchzuführen. Zur Steigerung der Empfindlichkeit sind noch zwei End- und
Abb. 10 eine Mittelscheibe aus weichem Eisen vorgesehen. Abb. 10 zeigt die Skizze eines Gerätes für 14 mm Zündkerzenbohrung. Durch die Ausarbeitung der Membran aus dem Vollen gemeinsam mit dem Indikatorkörper wird außerdem die Eigenfrequenz noch wesentlich erhöht.

Die elektrische Meß- und Verstärkereinrichtung für den Indikator ist die für das induktive Trägerfrequenz-Meßverfahren
Abb. 11 gebräuchliche 13 . Sie besteht (Abb. 11) im wesentlichen aus

einem Röhrensummer 7, welcher die Trägerfrequenz liefert und die Wechselstrombrücke 8 speist. In der Brücke wird die Trägerfrequenz entsprechend der Bewegung des Tauchankers, d.h. der Druckänderung, moduliert. Die Brücke besteht in dem einen Zweig aus der Doppeldrossel 3 des Indikators, während der andere Zweig aus zwei festen Ohmschen Widerständen 9, 10 und dem einstellbaren Widerstand 11 (zum Abgleichen der Brücke) gebildet wird. Zum genauen Phasenabgleich ist eine umschaltbare Parallelkapazität vorgesehen. Infolge der symmetrischen Anordnung der Brücke, und da je ein Brückenzweig, die Doppeldrossel im Indikator und die Abgleichwiderstände, auf je gleicher Temperatur liegen, hat eine Temperaturänderung - insbesondere wie sie im Laufe eines Arbeitsspiels auftritt - keinen Einfluß auf die Brückenabstimmung und somit auf die Nullinie und Empfindlichkeit. Außerdem ist es jederzeit möglich, die Brücke im betriebswarmen Zustand abzugleichen.

Zum Eichen der Empfindlichkeit und zur Kontrolle ihrer Reproduzierbarkeit dient ein zu- und abschaltbarer Widerstand 12, zum Verstimmen der Brücke. Ein Verstärker 4 mit Siebmitteln und Oberwellenfilter und eine Gleichrichterbrücke 5 mit nachgeschaltetem Endsieb (zur Unterdrückung der Trägerfrequenz) vervollständigen die Meßeinrichtung. Die Aufzeichnung kann entweder mit Kathoden- oder mit Schleifen-Oszillographen aufgenommen werden. Da beim Trägerfrequenzverfahren nur Frequenzen bis 1/5 der Trägerfrequenz unverzerrt aufgezeichnet werden, ist diese entsprechend hoch zu wählen.

Für die Aufnahme des pv-Diagramms eignen sich die die Schwinggeschwindigkeit aufzeichnenden induktiven Geräte weniger, da der Meßwert dann elektrisch integriert werden muß. Da diese Geräte aber zur Aufzeichnung von Klopfschwingungen sehr gut geeignet sind, sollen sie bereits hier aufgeführt werden. Abb. 12 gibt den MIT-Indikator+) als Klopfanzeigegerät

Abb. 12

+) Anm. f. d. Übers.: MIT = Firmenbezeichnung.

wieder. Hierbei taucht eine Meßspule nach dem Prinzip des elektro-magnetischen Lautsprechers in das magnetische Feld ein, und bei auftretenden Schwingungen werden Spannungen in der Spule induziert.

Kapazitive Meßverfahren

Auch die kapazitiven Verfahren wurden zur Aufzeichnung
Abb. 13 des pv-Diagramms verwendet. Abb. 13 zeigt die Kondensator-Druckmeßdose, mit welcher Schnauffer seine Motoruntersuchungen vorgenommen hat 14 . Die Eigenfrequenz liegt infolge der Notwendigkeit, eine größere Membran zwecks Erzielung einer genügenden Empfindlichkeit zu verwenden, bei etwa 2500 Hertz. Die Meßschaltung ist die der halben Resonanzkurve nach Riegger
Abb. 14 (Abb. 14) 15 . Die Kapazität des Meßgerätes bildet mit einer konstanten Selbstinduktion den Schwingungskreis des selbsterregten Röhrensenders I. Der durch die Meßkapazität veränderliche Schwingungskreis ist mit einem nach seinen Werten bekannten Schwingungskreis II gekoppelt. In diesem Kreis wird mittels einer Röhre, die als Verstärker und Gleichrichter wirkt, in bekannter Weise der Anodenstrom in einem Instrument oder der Meßschleife aufgezeichnet, wobei der Ruhestrom durch Gegenschaltung unterdrückt wird. Die Verschiebung des Meßkondensators kann statisch in Stromwerten geeicht werden.

In neuerer Zeit wurde das kapazitive Verfahren mit trägerfrequenz-modulierter Brückenschaltung von der Firma Philips zu einem sehr brauchbaren Meßindikator-Verfahren ausgebaut
Abb. 15, 16 16 . Abb. 15 zeigt den Indikator, während Abb. 16 die Meßschaltung wiedergibt. In der Wechselstrombrücke ist nur ein veränderlicher Kondensator 3 vorhanden. Außerdem ist durch die Zufuhr der Trägerfrequenz in Form von Niederspannung der Einfluß von Kapazitätsänderungen in den Zuleitungen weitgehend ausgeschaltet, so daß noch mit Meßzuleitungen von 10 bis 50 m Länge gearbeitet werden kann. Zu diesem Zwecke sind im Indikator selbst die drei festen Kapazitäten 4, 5, 6 und die Hoch-

Abb. 17 frequenz-Transformatoren 7, 8 untergebracht sind (Abb. 17). Die Temperatur der Membran darf 500° und die des Kopfteils des Indikators mit den Transformatoren 50° nicht überschreiten. Der Vorteil dieser Meßeinrichtung liegt wie bei allen Trägerfrequenzverfahren darin, daß der Geber statisch geeicht werden kann. Da aber infolge Durchbiegung der Membran Verschiebungen der Nullinie auftreten können, ist eine Hilfseinrichtung vorgesehen, bei der eine Spannung von einstellbarer Phase und einstellbarem Betrag der Meßwertspannung so hinzugefügt wird, daß der Wert Null im Ausgangspunkt, d.h. bei dem Druck Null, vorhanden ist. In Abb. 17 ist für diesen Zweck nach einem Vorschlag des Verfassers die Gegenschaltung einer Spannung, welche aus einer Thomsen-Brücke entnommen wird und in Betrag und Phase einstellbar ist, vorgesehen. Originalschaltung des Philips-Gerätes ist nicht veröffentlicht worden. Auch läßt sich

Abb. 18 ein kapazitiver Indikator in Brückenschaltung nach Abb. 18 leicht bauen, da heute genügend Zuleitungskabel mit konstanter

Abb. 19 Kapazität zur Verfügung stehen. Abb. 19 zeigt eine Konstruktionsskizze eines Indikators für 14 mm Zündkerzenbohrung. Als Isoliermittel wird Condensa-Material+) mit einer Dielektrizitäts-Konstanten = 80 verwendet. Dadurch ist es bei entsprechendem Plattenabstand möglich, auch bei kleinem Durchmesser die nötige Grundkapazität von etwa 150 cm zu erreichen, so daß eine genügende Empfindlichkeit gewährleistet wird. Da die Membrane mit dem Körper selbst aus dem Vollen gearbeitet ist, kann die Eigenfrequenz sehr hoch gewählt werden. Die Elektrode selbst ist in einer Platte aus hochisolierendem Material gehalten. Die Durchbiegung der Membran wird zu 10 bis 15 µ bei Vollast gewählt. Es ist allerdings noch zu untersuchen, wie weit der Indikator gekühlt werden muß, damit keine Änderung in der Dielektrizitäts-Konstanten des Materials für die Zwischenisolierung auftritt.

+) Anm. f. d. Übers.: Condensa = Markenbezeichnung.

Klopfmeßverfahren und Anzeigegeräte

Nachdem im wesentlichen alle Indikatoren und Hilfseinrichtungen besprochen wurden, soll nunmehr auf die eigentlichen Verfahren zum Messen von Klopfschwingungen und die Anzeigegeräte übergegangen werden.

Allgemeine Erkenntnisse über den Klopfvorgang

Nach der derzeitigen Auffassung des Klopfvorganges beginnt die klopfende Verbrennung in einer fortschreitenden Flammenfront, welche sich von der Zündkerze ausbreitet. Während dieses normalen Fortschreitens der Verbrennung besteht dauernd Druckausgleich zwischen dem verbrannten und dem unverbrannten Gemisch. Dadurch wird der unverbrannte Rest adiabatisch verdichtet und erwärmt. Beim Erreichen der Selbstzündungs-Temperatur wird der unverbrannte Rest praktisch auf einmal entzündet; der Druck kann sich nicht ausgleichen und springt daher auf einen sehr hohen Wert. Dieser plötzliche Druckanstieg, welcher nach Untersuchungen von E. Schmidt 17 in einer Zeit von etwa 10^{-5} s vor sich geht, kann mit den bis jetzt verwendeten Druckmeßgeräten nicht erfaßt werden, weil sie eine viel zu niedrige Eigenfrequenz haben.

Als Klopfschwingungen werden von den Druckmeßgeräten nur jene Druckausgleich-Schwingungen aufgezeichnet, die sich als stehende Eigenschwingungen des Verbrennungsraumes in Richtung eines Durchmessers bemerkbar machen. Da die Schallgeschwindigkeit bei den im Verbrennungsraum auftretenden Temperaturen in der Größenordnung von 1000 m/s liegt und die Abmessungen der Verbrennungsräume selbst etwa 10 cm betragen, liegen die Eigenschwingungen des Brennraumes bei einigen tausend Hertz. Schwingungen in Richtung parallel zur Zylinderachse, also senkrecht zum Kolben, wurden bereits ebenfalls beobachtet, doch liegen sie um mindestens eine Größenordnung höher und es ist daher sehr schwierig, sie zu messen.

Diese Schwingungen sind nur stehende Wellen ohne Temperatur- und Massenausgleich. Dies ist daraus zu ersehen, daß einmal eingebaute dünne Trennmembranen in Richtung parallel zur Zylinderachse nicht zerstört werden (Schnauffer) 18 . Außerdem aber treten Zerstörungen beim klopfenden Motor, die sich infolge der hohen Temperatur als Gefügeauflockerung bemerkbar machen, am Zylinder und Kolben nur an begrenzten, immer von der Zündkerze weitest entfernten Stellen auf. Außerdem gibt es am Zylinder selbst Stellen, an denen keine Druckschwingungen gemessen werden können, d.h. Knotenpunkte der stehenden Wellen.

Es läßt sich errechnen 19 , daß der Druck bei der Durchzündung des Gemischrestes ein Mehrfaches des unmittelbar vor diesem Vorgang im Zylinder herrschenden Druckes erreicht. Der auftretende Druck ist um so größer, je größer bei Beginn des Klopfens bereits der Anteil des verbrannten Gemisches ist; weil dann der Ausgangsdruck des auf kleinstem Raum zusammengedrängten Gemischrestes und seine Temperatur bereits sehr hoch sind, so daß die Zündgeschwindigkeit und somit der Ausgleichsdruck entsprechend höher sind. Da der Energieanteil dagegen kleiner ist, liegt das Maximum der Anzeige von Klopfschwingungen und der Zerstörungen bei größeren Anteilen des durchzündenden Gemischrestes. Vielleicht ist das Klingeln, welches ja zuerst auftritt, d.h. bei kleinerem Anteil des durchzündenden Gemischrestes, durch den ausgelösten harten Druckstoß zu erklären, während beim Klopfen als hörbare Erscheinung infolge der länger anhaltenden stehenden Gasschwingungen Motorenbauteile mit erregt werden.

Den Druckanstieg anzeigende Meßverfahren und Geräte

Die ersten Messungen, mit denen man den Beginn der Klopfschwingungen festzustellen versuchte, wurden mit wesentlich einfacheren Geräten als den heutigen Druckindikatoren

durchgeführt. Neben den rein akustischen Verfahren, Feststellung des Klopfbeginns (harter Gang, Klingeln usw.) mittels Gehör oder durch Temperaturmeßgeräte wurden Geräte entwickelt, welche auf den plötzlichen Druckanstieg ansprechen. Für die Kraftstoffprüfung nach dem CFR-Verfahren wurde der Springstab-
Abb. 20 Indikator (Bouncing Pin) nach Midgely verwandt. Abb. 20 zeigt dieses Gerät. Der Aufspringstab 2 wird durch eine Feder auf die Membran 1 gedrückt. Treten nun im Motor Druckstöße auf, so springt der Stab in die Höhe und schließt den Kontakt 3. Die Menge des Knallgases, das aus einer Säurelösung von dem während des Klopfens fließenden Strom in einer gewissen Zeit erzeugt wird, wird als Maß für die Klopfstärke festgesetzt. Ebenso kann der Ausschlag eines stark gedämpften Milliamperemeters (Hitzdraht-Instrument) im gleichen Stromkreis als Klopfmaßstab festgelegt werden.

Für die genaueren Untersuchungen der Treibstoffe auf Klopffestigkeit reicht aber die Untersuchung mit dem Springstab nicht aus. So interessiert insbesondere der Zeitpunkt des Klopfbeginns, d.h. die Überladung, Verdichtung usw., bis zu welcher der Motor noch gefahrlos betrieben werden kann. In Deutschland wurde für diese Zwecke insbesondere der Quarzindikator herangezogen. Bei dem ersten Verfahren wurden die pv-Diagramme aufgenommen und ausgewertet. Bei günstiger Lage des Druckindikators (im Schwingungsbauch der stehenden Welle) kann man auch hieraus bereits die Schwingungszahl und Stärke ent-
Abb. 21 nehmen. Abb. 21 zeigt ein solches Diagramm 20 , während Abb.
Abb. 22 22 den mittleren Druckverlauf an der gleichen Stelle des Motors bei verschiedenen Klopfstärken zeigt. In neuerer Zeit wurde von der I.G. ein Klopfmeßverfahren auf dieser Grundlage für den I.G.-Prüfmotor entwickelt 21 . Zur Verstärkung wird dabei eine schwingende Gassäule in einem Kanal herangezogen, dessen Eigenfrequenz gleich der Klopffrequenz ist. Für den I.G.-Motor beträgt die günstigste Länge dieses Stutzens 40 mm bei 8 mm Durchmesser. Außerdem werden die Grundfrequenz und die niederen Harmonischen, d.h. das eigentliche pv-Diagramm,

Abb. 23 ausgesiebt. Abb. 23 zeigt Aufnahmen, welche nach diesem Verfahren bei verschiedenen Verdichtungen ermittelt wurden, während
Abb. 24 Abb. 24 die Schaltung des Gerätes bei Verwendung eines Thermo-Umformers mit großer Zeitkonstanten als Anzeigeinstrument wiedergibt. Die Grundfrequenz wird bei Verwendung einer Quarzdose als Geber in einfacher Weise durch die Bemessung des Eingangswiderstandes (r 10^6) ausgesiebt. Ein anderer Weg ist der, die Verstärkerschwingungen gleich zu richten und einen Kondensator damit aufzuladen. Der Entladewiderstand wird so bemessen, daß sich der Kondensator nur langsam entlädt. Die Spannung des Kondensators liegt am Gitter eines Endrohres, dessen Anodenstrom von einem Instrument gemessen wird,
Abb. 25 wobei der Ruhestrom kompensiert ist. Abb. 25 zeigt die Schal-
Abb. 26 tung, während Abb. 26 den Vergleich verschiedener Oktanzahlmessungen mit Messungen mittels des Springstab-Indikators zeigt. Daraus ist zu ersehen, daß die Genauigkeit in diesem Zustand der Entwicklung nicht viel über der des Springstab-Indikators liegt.

Im Ausland wurden in der Hauptsache die Druckmeßgeräte nach dem Induktionsverfahren, z.B. das MIT-Klopfanzeigegerät (Abb. 12) und der Sunbury-Indikator, verwendet. Da bei diesen Geräten die elektromotorische Kraft um so größer ist, je rascher der Druck ansteigt, d.h. je größer die Amplitude der Klopfschwingung ist, so kann für bestimmte Spannungen, d.h. Klopfschwingungsamplituden, ein Glimmrohr oder Stromtor zum Zünden gebracht werden und als Anzeige des Klopfbeginns benutzt werden.

Vom Verfasser selbst wurde der in Abb. 9 11 dargestellte induktive Druckindikator ebenfalls als Klopfmeßgerät verwendet. Dabei wird nur eine Spule des Differentialsystems mit
Abb. 27 Gleichstrom erregt und nach Abb. 27 geschaltet. Nach dem elektrodynamischen Prinzip wird durch die Bewegung des Tauchankers eine Wechselspannung in der Spule induziert, welche sich der Gleichspannung überlagert. Da bei dieser Anordnung die Eigen-

schwingungszahl der Membran durch die Spule nicht mehr herabgesetzt wird, kann diese so groß ausgeführt werden, daß mit dem Gerät eine genügende Empfindlichkeit erzielt wird. Ebenso kann der empfindlichste Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskurve durch Änderung der Gleichstromerregung eingestellt werden. Die Eigenschwingungszahl des Klopfgerätes ist fast nur durch die Dimensionen der Membran bedingt, da ja der kleine Tauchanker, welcher übrigens als Röhrchen ausgeführt werden kann, keine wesentlichen Änderungen bewirkt. Die Membran kann leicht mit 30 000 Hertz Eigenfrequenz hergestellt werden, und da die Eigenschwingungen des Tauchankers in radialer Richtung keine Störungen mit sich bringen, ist die Anfälligkeit des Gerätes gegen Störungen gering. Durch die Fremderregung mit Gleichstrom in der Spule wird gleichzeitig eine Dämpfung jeder auftretenden Schwingung erreicht. Die elektrische Schaltung ist aus Abb. 27 zu ersehen. Eine Gleichstrombatterie 5 speist die Spule über einen genügend hohen Widerstand 6 oder eine Drossel 7, welche verhindern, daß sich die auftretenden Wechselspannungen über die Batterie kurzschließen. Die Erregung kann veränderlich eingestellt werden und wird mit Hilfe des Strommessers 8 festgelegt. Die Wechselspannung wird dem Verstärker zugeführt. Da jedem Wechselstromverstärker am Eingang zur Blockierung der Gleichspannung ein Kondensator 9 vorgeschaltet ist und das Gitter über Widerstände 10 mit der Kathode verbunden ist, wird bereits hier bei geeigneter Bemessung des RC-Gliedes eine Differentiation vorgenommen.

Da der Indikator bei der oben angeführten Schaltung bereits das dp/dt-Diagramm in seiner Wechselspannung anzeigt, wird vom Verstärker das d^2p/dt^2-Diagramm abgegriffen. Ebenso läßt sich auch mit elektrischen Mitteln eine Integration und somit die Aufzeichnung des pv-Diagramms erreichen.

Da eine genaue Auswertung der Diagramme nur dann von Wert ist, wenn neben der trägheitsfreien Druck- und Schwingungsanzeige auch die genaue Zuordnung zur Zeitachse und zum Totpunkt

der Maschine möglich ist, soll noch eine einfache Totpunktsmarkierung angeführt werden. Wird nämlich eine Spule mit wenig Windungen in Reihe mit der erregten Indikatorspule geschaltet, so kann durch einen mit Motordrehzahl umlaufenden Eisenstab in bekannter Weise durch den Induktionsstoß die Totpunktsmarkierung oder bei mehrfacher Anordnung eine Einteilung der Aufzeichnung in Kurbelwinkelgrade vorgenommen werden.

Abb. 28 — Abb. 28 zeigt mit diesem Indikator aufgenommene Oszillogramme, bei Klopfbeginn nach Gehör (Bleibenzin Oktan 87, Verdichtung = 6,62) im CFR-Motor und bei klopfendem Betrieb (Oktan 64, Verdichtung = 5,7). Die Auswertung der Schwingungszahl ergibt 6800 bis 7000 Hertz, was mit den Untersuchungen von C. S. Draper 22 gut übereinstimmt. Dieser hat für den CFR-Prüfmotor 6900 Hertz Eigenschwingung berechnet und festgestellt, wobei die Änderungen der Frequenz infolge Erhöhung der Schallgeschwindigkeit durch Temperatursteigerung noch zu berücksichtigen sind.

<u>Meßverfahren, die einen Knick im Ladedruck- und Verdichtungsdiagramm aufweisen</u>

In neuerer Zeit ging man in der Praxis dazu über, Klopfmeßgeräte zu entwickeln, welche den Klopfbeginn viel genauer als mit dem Springstab-Indikator festzulegen gestatten. So wurde der Weg, das Klopfen aus der Veränderung im Druck-Zeit-Diagramm zu erfassen (Abb. 22) weiter ausgebaut und vervollkommnet. Da aber im Druck-Zeit-Diagramm diese Änderung zu klein ist, wurde von Dodds, Illgen und Hintze die elektrische Differentiation durchgeführt 23; 24 . Bessere Ergebnisse zeigen aber Versuche von Seeber und Lichtenberger mit zweifacher Differentiation, d.h. das Aufzeichnen des d^2p/dt^2-Diagramms 28 , da hierbei die Unterschiede zwischen Klopfen und Nichtklopfen um eine Größenordnung wachsen. Trägt man z.B. die Amplitude über dem Ladedruck auf, so erhält man beim Klopfbeginn einen

Abb. 29 eindeutigen Knick (Abb. 29). Dieser Knick kann auch bei anderen Meßverfahren festgestellt werden. Schütz 25 stellte bei der Aufnahme der Brenngeschwindigkeit (von Schütz vereinfachtes Ionisationsverfahren nach Schnauffer) ebenfalls einen Knick bei Klopfbeginn fest. Ebenso ergibt sich, wie später noch ausgeführt wird, bei der Messung der Zylindertemperatur mittels Meßstopfens ein deutlicher Knick bei Klopfbeginn.

Abb. 30 Die selbständige electrische Differentiation kann auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Wenn wie in Abb. 30 der Meßwert z.B. dp/dt auf das Gitter einer Röhre gegeben wird, dann kann an der Drossel im Ausgangskreis als Spannung d^2p/dt^2 abgegriffen werden. Diese Differentiation ist soweit genau, wie der Widerstand der mit geringer Kapazität gewickelten Drossel als verhältnismäßig klein angesehen werden kann. Da aber in der Anzeige die einzelnen Klopfstöße unregelmäßig sind und bei gleicher Einstellung um etwa 100 % und mehr in der Amplitude streuen, so ist eine genaue Auswertung der Einzel-Diagramme schwer möglich. Daher ist es wieder zweckmäßig, wie in Abb. 25 einen Kondensator aufzuladen und die Ladespannung als Stromwert über einen Tintenschreiber aufzuzeichnen. Abb. 31 zeigt eine solche Aufzeichnung. Daraus kann bereits der Knick und somit der Klopfbeginn festgestellt werden.

Abb. 31

Die theoretische Begründung für das Auftreten des Knickes bei Klopfbeginn wurde von Jost und von F. A. F. Schmidt 26; 27 aufgestellt. Für die genaue Betrachtung muß auf die Originalarbeiten verwiesen werden. Im wesentlichen ist der Vorgang so, daß der Druck vor Klopfbeginn einer Funktion $p = f(t, p_o, T_o)$ unterliegt, worin p der Zylinderdruck,

t die Zeit,

p_o der Anfangsdruck (Ansaugedruck)

und T_o die Anfangstemperatur

bedeuten. Sobald sich nun die Verbrennungsart bei Klopfbeginn ändert, folgt der Druck p einer anderen Funktion $p = F(t, p_o, T_o)$, wobei beide Funktionen im Augenblick der Durchzündung gleiche Werte haben. Im wesentlichen liegt der Unterschied im

Exponenten. Bei der Ableitung der Funktion tritt eine Änderung der Neigung auf, die sich bei der zweiten Ableitung bereits als deutlicher Knick kenntlich macht. Eine höhere Ableitung, welche sich aber schwieriger darstellen läßt, würde eine noch größere Steilheit im Knick ergeben.

Abb. 32 Abb. 32 ist eine Zusammenstellung einiger Aufnahmen aus der Arbeit von Lichtenberger und Seeber 28 , aus der deutlich das Verhalten zu ersehen ist. Die seitlichen Maßstäbe lassen erkennen, in welcher Größenordnung sich durch die zweite Differentiation das Verhältnis zwischen klopfendem und nichtklopfendem Betrieb ändert.

Wie bereits erwähnt, läßt sich auch durch thermische Messungen bei Klopfbeginn ein Knick feststellen. Diese Versuche wurden an der Technischen Hochschule Dresden im Institut für Kraftfahrwesen zu dem Zwecke durchgeführt, im Mehrzylinder-Otto-Motor auf einfache Weise den Klopfbeginn aller Zylinder gleichzeitig festzustellen. E. Schmidt 17 und R. Sinn 29 haben nachgewiesen, daß die Wärmeübergangszahl mit der Klopfschwingung stark zunimmt. Es wird dies damit erklärt, daß das bis an die Wandungen heran verbrannte Gas durch den plötzlich auftretenden Druckstoß adiabatisch verdichtet wird und somit eine noch höhere Temperatur erreicht. Da außerdem die heißen Schichten immer näher an die Wand herangedrückt werden, steigt die Temperatur weiter an. Der Temperaturgradient wächst nach Berechnungen von E. Schmidt auf ungefähr das Dreifache gegenüber dem der normalen Verbrennung an, so daß somit im Mittel 50 % mehr Wärme an das Kühlwasser abgegeben wird als bei nichtklopfendem Betrieb.

Auf Grund dieser Überlegungen wurde ein Meßstopfen entwickelt, der eine Messung der Temperatur an der Innenwand des Zylinders zuläßt, d.h. an der Stelle, an welcher sich die Temperaturerhöhung zuerst bemerkbar macht. Abb. 33 zeigt diesen
Abb. 33 Meßstopfen, der zuerst am I.G.-Prüfmotor anstelle des Spring-

Abb. 34 stab-Indikators eingesetzt wurde. Abb. 34 gibt eine neuere Ausführung wieder. Der Thermostrom wird über einen Widerstand von einem Galvanometer gemessen.

Bei der Erprobung im Einzylinder-Motor wurde so vorgegangen, daß nach der Veränderung des Verdichtungsverhältnisses am laufenden Motor nach einer gewissen Einlaufzeit die Temperatur abgelesen und im Diagramm aufgetragen wurde (Abb.
Abb. 35 35. Wie im Versuchs-Bericht angeführt ist, konnte bei der Kontrolle mit anderen Meßgeräten vollkommene Übereinstimmung erzielt werden und der Knick bereits vor Eintreten des hörbaren Klopfbeginns festgestellt werden.

Klopfmeßverfahren für Motoruntersuchungen ohne Induziereinrichtungen

Allen vorher angeführten Verfahren haftet der Nachteil an, daß außer der Zündkerzenbohrung an der Stelle, wo die Durchzündung des noch unverbrannten Gemisches auftritt, noch eine Bohrung vorhanden sein muß, um ein Anzeigemeßgerät einsetzen zu können. Es können daher alle diese Versuche nur an besonders vorbereiteten Motoren vorgenommen werden. An Motoren aus der Serienherstellung und insbesondere bei Vielzylindermotoren sind solche Untersuchungen undurchführbar. Außerdem ist es auch bei genauer Eichung des Druckgerätes an einem Motor nicht möglich, die Eichkurven für die Auswertung bei Messungen an anderen, wenn auch gleich gebauten Motoren zu verwenden. Es muß also jedesmal eine Neueichung zur Festlegung der Meßwerte beim Umsetzen des Gerätes auf andere Motoren durchgeführt werden. Ebenso ist es leicht möglich, beim Einbau des Druckindikators eine Stelle zu treffen, an welcher überhaupt keine Druckschwingungen auftreten (Knotenstelle in der stehenden Welle). Daher ist es insbesondere für schnelllaufende Vielzylindermotoren am zweckmäßigsten, wenn man zwecks Feststellung des Klopfverhaltens der einzelnen Zylinder

mit dem Meßgerät nur die durch die Klopfschwingungen erregten Motoranteil-Schwingungen von außen ohne Eingriff am Motor selbst aufnimmt. Es eignen sich dazu sowohl die induktiven, kapazitiven als auch die akustischen Meßverfahren.

<u>Induktives Schwingungsaufnahmegerät</u>

Vom Verfasser wurde ein Meßverfahren aufgezeigt 30, welches es gestattet, mit bereits bekannten und erprobten Meßgeräten in einfacher Weise die beim Klopfen des Motors auftretenden Schwingungen am Zylinderkopf oder anderen Teilen des Motors aufzunehmen und aufzuzeichnen. Als Aufnahmegerät für die auftretenden Schwingungen wurde eine gewöhnliche Schallplatten-Wiedergabedose verwendet, wobei die Nadel direkt auf das Gehäuse oder den Zylinderkopf aufgesetzt wird. Um ein Abheben der Nadel bei den auftretenden Beschleunigungen zu verhindern, wird die Meßdose durch ein federndes Glied aufge-
Abb. 36 drückt. Bild 36 zeigt beispielsweise das Meßgerät am Zylinderkopf eines luftgekühlten Flugmotors, wobei die Federung durch einen starken Gummischlauch erzielt wurde. Das Oszillo-
Abb. 37 gramm 1 in Abb. 37 zeigt eine Aufnahme der Gesamtschwingung
Abb. 38 eines klopfenden Motors, während Oszillogramm a in Abb. 38 an demselben Motor in nichtklopfendem Betrieb aufgenommen wurde. Es lassen sich wohl schon aus diesen beiden Oszillogrammen, bei denen die von der Meßdose aufgenommenen Schwingungen nur durch einen Wechselstromverstärker vom Schleifenoszillographen aufgezeichnet werden, bedeutende Unterschiede in den Schwingungsamplituden feststellen.

Da bei diesem Verfahren nicht der Schwingungsverlauf des Gases im Verbrennungsraum aufgenommen wird, sondern die durch die Druckschwankungen mehr oder weniger angeregten Schwingungen der einzelnen Motorenteile, ist es zweckmäßig, die Gesamtschwingung zu analysieren. Dies ist um so mehr notwendig, als dadurch festgestellt werden kann, welche auftretende Schwingung

den größten Unterschied in der Amplitude zwischen klopfendem und nichtklopfendem Betrieb aufweist und somit am besten zur Anzeige des Klopfbeginns verwendet werden kann.

Abb. 39 Mit Hilfe eines Oktavsiebes von Siemens & Halske, welches aus einer Reihe von Siebketten mit der Bandbreite einer Oktav besteht, kann die Analyse am leichtesten durchgeführt werden. Abb. 39 zeigt die Betriebsdämpfungskurven des Oktavsiebes für 2 x 8 Oktaven. Um einen Vergleich mit den bereits durchgeführten Klopfuntersuchungen zu ermöglichen 12 , wurde zuerst wieder ein CFR-Motor unter den gleichen Bedingungen wie in der früheren Arbeit untersucht. Die Meßdose wurde am Zylinderkopf ähnlich Abb. 36 angebracht. Abb. 37 zeigt die Aufnahme der gesamten Schwingung und ihrer Analyse. Der Motor war bei 900 U/min so eingestellt, daß das Knockmeter einen Ausschlag von 50 anzeigt. Der Zündzeitpunkt ist in den Oszillogrammen deutlich an dem Hochspringen der aufgezeichneten Kurven zu erkennen. Kabel und Dose wurden hier absichtlich nicht geschirmt, damit der genaue Zündzeitpunkt festgestellt werden konnte. Die einzelnen Oszillogramme der verschiedenen Oktaven sind nacheinander aufgenommen worden, doch läuft der Motor auch im Klopfzustand sehr stabil, so daß sich die einzelnen Arbeitsspiele nicht sehr unterscheiden.

Die Analyse des Klopfschwingungsbeginns zeigt, daß er durch eine steile Wellenfront, welche sich akustisch in dem harten Klopfschlag bemerkbar macht, eingeleitet wird. Darüber lagern sich die einzelnen Frequenzen, mit denen der Zylinderkopf und die anderen Motorenteile schwingen. Den größten Ausschlag ergibt die Schwingung f in Abb. 37 bei einer Frequenz von etwa 660 Hertz. In Abb. 38 sind Oszillogramme von Motorschwingungen der Übersichtlichkeit wegen nur in drei Oktaven aufgezeichnet. Die Kurven a bis d in Abb. 38 zeigen den Motor im klopffreien Zustand (nach Gehör), während ihn die Kurven e bis h in einem Klopfzustand mit Knockmeterausschlag 50 zeigen. Auch hier wird wieder bestätigt, daß der Schwingungsbe-

ginn mit dem hörbaren Klopfbeginn nicht identisch ist, sondern daß die charakteristischen Schwingungen bereits vor dem hörbaren Klopfbeginn auftreten.

Abb. 40 Der Vollständigkeit halber sind in Abb. 40 Oszillogramme von einem Einzylinder-Flugmotor wiedergegeben. Die Schwingungen wurden hier, da der Zylinder vollständig gekapselt war, am Lagerschild abgegriffen. Kurve a zeigt den Motor während des Warmlaufens bei n = 2500 U/min. Die Frequenz, welche hier (mit dem Sieb 800 bis 1600 Hz aufgenommen) im Arbeitshub angezeigt wird, beträgt 1330 Hz. Die Kurve b zeigt den Motor an der Klopfgrenze im harten Gang (n = 2700 U/min), während Kurve c den Motor im Klopfzustand wiedergibt (n = 2700 U/min).

Das Verfahren konnte vom Verfasser wegen anderer dringlicher Aufgaben nicht weiter verfolgt und ausgebaut werden.

Akustisches Aufnahme-Verfahren

Zu gleicher Zeit wurde von A. W. Schmidt 31; 32; 33 das auf gleichem Prinzip beruhende, nur mittels akustischem Aufnahmegerät arbeitende Meßverfahren entwickelt und für die Reihenuntersuchungen von schnellaufenden Motoren, insbesondere Fahrzeugmotoren, ausgebaut. Auch hier wird eine Siebung vorgenommen zur Unterdrückung der allgemein auftretenden Geräusche und zur genauen Unterscheidung der wirklich interessierenden Frequenzen, d.h. der durch die Gasschwingungen erregten Schwingungen von Motorenteilen. Um eine starke Aussiebung der Störfrequenz zu erreichen, werden die Siebgeräte mit einer großen selektiven Verstärkung ausgestattet. Da außerdem das Gerät universell verwendet werden soll, sind diese Siebgeräte abstimmbar vorgesehen (etwa zwischen 700 bis 4000 Hertz für Prüfstandsversuche; für Betriebsversuche an Motoren selbst, z.B. für Fahrtversuche, zwischen 1 bis 50 KHertz).

Abb. 41 Abb. 41 zeigt das entwickelte Meßgerät. Das akustische Aufnahmegerät ist als piezoelektrischer Beschleunigungsmesser
Abb. 42 aufgebaut. Abb. 42 zeigt einen Schnitt durch ein solches Gerät. (Da die Veröffentlichung des Originalgerätes nicht greifbar ist, ist ein eigener Vorschlag wiedergegeben.) Als Anzeigegerät wird ein Piezoquarz mit vorgespannter Hülse (Abb. 23) verwendet, welcher durch die bei Beschleunigung an der Masse auftretenden Kräfte mehr oder weniger entlastet wird. Die auftretenden Ladespannungen werden in bekannter Weise dem Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt. Die im Gerät vorgesehene Membran dient nur als Stütze, um ein Ecken der geführten Masse
Abb. 43 zu verhindern. Abb. 43 zeigt Klopfbilder vom Einzylinder-Prüf-
Abb. 44 motor bei verschiedenen Verdichtungen, während Abb. 44 mit dem Gerät durchgeführte Klopfmessungen an verschiedenen Benzinen wiedergibt. Bei Vergleichsversuchen ergab sich, daß die Genauigkeit trotz der so einfachen und vielseitig verwendbaren Anordnung etwa mit der des Springstab-Indikators übereinstimmt. Von A. W. Schmidt und seinen Mitarbeitern wurden mit diesen Verfahren viele Betriebs-Versuche, insbesondere in der Ebene, am Berg, bei Beschleunigungen usw. durchgeführt. Es wurde das Klopfverhalten der einzelnen Zylinder in Bezug auf die gleichmäßige Brennstoffzufuhr untersucht und Oktanzahlbestim-
Abb. 45 mungen an Mehrzylindermotoren selbst durchgeführt. Abb. 45 zeigt Aufnahmen von Klopfschwingungen an einem Vier-Zylinder-Fahrzeugmotor während der Fahrt auf der Landstraße. Unter den verschiedensten Belastungsverhältnissen wurde hier der Klopfbeginn des Motors hervorgerufen. Es zeigt sich, daß immer dieselben Zylinder wie am Prüfstand zum Klopfen neigen, da sich die Gemischzufuhr und die Verschiedenheit in der Zusammensetzung des Gemisches auch in Fahrbetrieb nicht wesentlich ändert.

Bei allen Diagrammen wird meistens zwecks leichterer Auswertung und Festlegung der Zylinderreihenfolge die Zündung eines Zylinders mit aufgezeichnet, während die anderen Zündungen zur besseren Übersicht durch Abschirmung der Leitungen unterdrückt werden. Um auch die Brauchbarkeit des Verfahrens

unter den schwierigsten Bedingungen darzustellen, sind in Abb.
Abb. 46 46 Aufnahmen von einem Einzylinder-Flugmotor wiedergegeben.
Der Klopfschlag ist deutlich aus dem Gesamtgeräuschbild zu erkennen. Der schmale, große Ausschlag ist die Markierung des Zündfunkens, die kleinen Ausschläge rechts und links stammen von den Ventilgeräuschen (Abb. 40).

Kapazitives und induktives Trägerfrequenz-Aufnahmegerät

Ebenso ist es aber auch leicht möglich, zur Aufnahme der Schwingung das kapazitive oder induktive Trägerfrequenz-Meßverfahren zu verwenden, wie es bereits anderweitig für Be-
Abb. 47 schleunigungsmessungen verwendet wurde 34 . Abb. 47 zeigt den Vorschlag für eine kapazitive Aufnahmedose, welche in Schaltung nach Abb. 18 betrieben wird. Bei diesem Verfahren werden höhere Schwingungen als die der Trägerfrequenz bereits nicht mehr angezeigt. Das veränderliche Störfrequenzsieb muß hier nach der Gleichrichtung vorgesehen werden. Die Wirkungsweise des Meßgerätes ist wohl aus der Abbildung zu ersehen. In einem Gehäuse, das aus dem Bodenstück 6 und dem Oberteil 7 besteht, ist ein Ringkörper eingeschraubt, der die Membranen 17 mit der trägen Masse 12 enthält. (Die Masse wird für diesen Verwendungszweck besser als langer Zylinder ausgeführt wie in Abb. 42). Durch den aufgepreßten Isolierring 3 wird eine Elektrode 4 in festem Abstande über der Massenelektrode 5 gehalten. Ein Anschluß für das Zuführungskabel konstanter Kapazität vervollständigt das Gerät.

Auf gleiche Weise läßt sich leicht ein induktives Trägerfrequenzgerät als Beschleunigungsmesser, in diesem Falle sogar mit bedeutend kleineren Abmessungen, herstellen 35 . Als Anzeigegerät wird ein Längenmeßgerät eingebaut.

Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß für die Weiterentwicklung der Verbrennungskraftmaschinen und für die Untersuchungen des motorischen Verhaltens neuer Kraftstoffe in den bereits entwickelten oder vorgeschlagenen Meßgeräten der Forschung und der Praxis genügend Hilfsmittel zur Verfügung stehen.

Für die Einzeluntersuchungen am Prüfstandsmotor ist mit dem Piezo-Quarz ein sehr brauchbares Meßgerät entwickelt worden, während sich für die Klopf-Untersuchungen an Serienmotoren die Verfahren zur Aufzeichnung der erregten Motorenteil-Schwingungen am besten eignen.

gez. Dr. Josef Ratzke
Berlin-Adlershof

Schrifttum - Verzeichnis

1 K. J. de Juhasz: The engine Indikator. New York 1934

2 J.H. Collins jr.: Alterations and Tests of the "Farnbor" (1930) NACA, TN Nr. 748.

3 E. S. Taylor und C. S. Draper: A New High-Speed Indicator, Mechanical Engineering, March 1933.

4 R. Brandt und H. Viehmann: Der DVI-Glimmlampen-Indikator und seine Anwendung. Kraftfahrtechnische Forschungsarbeiten, Heft 8.

M. Scheuermeyer: Meßgeräte zur Untersuchung der Arbeitsvorgänge in schnellaufenden Verbrennungsmotoren. Jahrbuch der dt. Luftfahrtforschung II S. 258.

5 W. Glamann und H. Treibnigg: Der trägheitslose elektrische Halbleiter-Indikator für Druckmessungen. Forschg.Ing.Wes. Bd. 4(1933) S. 137.

6 J. Kluge und H. E. Linkh: Piezo-elektrische Messungen von Druck- und Beschleunigungskräften. Z.VDI, Bd. 73 (1929) S. 1311.

7 Dieselben: Peizo-elektrische Messung mechanischer Größen. Forschg.Ing.Wes.Bd. 2 (1931) S.103.

8 Dieselben: Piezo-elektrische Druckmessungen mit der Braunschen Röhre. Forschg.Ing.Wes. Bd. 4 (1933) S. 177.

9 S. Meurer: Neuere Mittel zur Untersuchung der Vorgänge im Motor. Berichtsheft der 74. Hauptversammlung des VDI, Berlin 1936, S. 242.

10 S. Meurer: Beitrag zum Bau piezo-elektrischer Indikatoren. Forschg.Ing.Wes. Bd. 8 (1937) S. 249.

11 L. Bisang: Beitrag zur Entwicklung des Quarz-Indikators und seine Anwendung. Kraftfahrtechnische Forschungsarbeiten, Heft 8.

12 J. Ratzke: Ein elektromagnetischer Indikator und Klopfmesser. Jahrbuch der dt. Luftfahrtforschg. II. S. 368 (1938).

13 Derselbe: Ein neuer elektrischer, dynamischer Dehnungsmesser. Jahrbuch 1937 der dt. Luftfahrtforschg. II S. 278.

14 K. Schnauffer: Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels Verfahrens der halben Resonanzkurve. Jahrbuch 1930 der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, S. 304.

15 H. Riegger: Über klangtreue Schallaufnahmen-Verstärkung und Wiedergabe. Z.f.techn. Physik Bd. 5 (1924).

16 N. V. Philips: Gloeilampenfabrieken, Eindhoven. Informationsschrift über Kathodenstrahl-Druckindikator G. M. 3154.

17 E. Schmidt: Über das Klopfen und die damit verbundene Verminderung des Wirkungsgrades von Otto-Motoren. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, Heft 9 (1939) S. 215.

18 K. Schnauffer: Im: Diskussionsbeitrag zu dem unter 17 angeführten Vortrag von E. Schmidt

19 G. Damköhler: Gasbewegung in einem geschlossenen Verbrennungsraum bei einzeitiger Zündung. Jahrbuch 1938 der Deutschen Luftfahrtforschung II S. 62.

20 J. J. Broeze, H. van Driel und L. A. Pelotier: Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung Heft 9 (1939) S. 187.

21 E. Schuch: Über Versuche zur Bestimmung der Klopfstärke. Bericht über die Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung, Juli 1941. Herausgegeben von der I.G.-Farben A.G., Ludwigshafen/Rhein.

22 C. S. Draper: Pressure Waves Accompanning Detonation in the Internal Kombustion Engine. Journal of the Aeronautical Science, April 1938.

23 E. M. Dodds: Some results obtained on the cathode ray engine Indicator. J.Roy. Aeronautical Soc. Bd. 41 (Febr. 1937) Nr.314 S. 132.

24 H. Illgen und H. Hintze: Beitrag zur Prüfung von Brennstoffen mittels des piezo-elektroschen Indikators. Deutsche Motor-Z., Bd. 14 (1937) Heft 14, S. 372.

25 R. Schütz: Messung der Klopffestigkeit an Otto-Motoren. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 37.(1939) VDI-Verlag.

26 W. Jost: Verbrennungsvorgänge in Gasen. Angewandte Chemie, Jahrgang 51 (1938) Nr. 40 S. 687.

27 F.A.F.Schmidt: Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Verbrennungsvorgängen im Zünder- und Diesel-Motor. Luftfahrtforschung Bd. 14 (1937) Heft 12, S. 641.

28 F. Seeber und F. Lichtenborger: Klopfmessung mit dem DVL-Verfahren der Druckbeschleunigung. Kraftstoff Jg. 1941 Heft 6/7.

29 R. Sinn: Wärmeübergang bei schwingenden Gasen, Z. VDI Bd. 83 Nr. 45 (1939).

30 J.Ratzke: Beitrag zur Messung von Klopfschwingungen, Motortechn.Z. (MTZ) Bd. 6 (1940) S. 4.

31 A. W. Schmidt und K. Generlich: Untersuchung der Klopfgeräusche von Otto-Motoren mit elektro-akustischen Meßgeräten. Deutsche Kraftfahrtforschung 1939, Heft 33.

32 P. Funk: Elektro-akustische Bestimmung des Klopfverhaltens, ATZ, Jg. 1942, Heft 2

33 A. W. Schmidt: Oktanzahl- und Mehrzylinder-Motor. ATZ, Jg. 1942, Heft 2, S. 26

34 F. I. Meister: Untersuchungen zur Schaffung geeigneter Kraftfahrzeug- und Flugzeug-Schwindungsmesser. Deutsche Kraftfahrtforschung, Techn. Bericht Nr. 26.

35 J. Ratzke: Neue elektr. Meßgeräte mit Trägerfrequenzmodulation. Die Meßtechnik Bd.15 (1939) S. 209.

Abbildungsunterschriften

Abb. 1. Kohle-Druckmeßkammer nach Glamann und Triebnigg
1 Gehäuse
2 Deckel
3 Halbleitersäule
4 Wasserkühlung
5 Abschlußmembran
6 Hauptmembran

Abb. 2. Quarz-Indikator (Hülsenbauart)

Abb. 3. Quart-Indikator (Hülsenbauart mit Wasserkühlung)
1 Quarze
2 Elektroden
3 Hülse
4 Abdichtmembran
5 Kühlwasserzuführung
6 Bernstein-Isolation
7 Ableitungs-Elektrode

Abb. 4. Schaltplan einer piezo-elektrischen Indiziereinrichtung mit 3stufigem Verstärker und Schleifen-Oszillographen (Schematisch als Batteriegerät)
1 Eichgerät für gleiche Spannungsstufen
2 Einstellung der Grundspannung
3 Kompensation
4 Meßschleife
5 Ausschlag für Meßschleife

Abb. 5. Einfluß der Schleifendämpfung auf die Diagrammgestaltung
= Dämpfungsgrad

Abb. 6. Nacheilungswinkel verschiedener Schleifenbauarten, abhängig von der Frequenz

Abb. 7. Schnitt durch einen Geber für induktive Druckmessung
1 Indikatorkolben
2 Übertragungsstempel
3 Hauptmembran
4 Anker
5 Drosselspule
6 Anschluß an eine Wechselstrombrücke

Abb. 8. Induktiver Indikator

Abb. 9. Schnitt durch einen induktiven Indikator nach Abb.8
1 Indikatorgehäuse
2 Membran
3 Tauchanker
4 Dichtungsring
5 elektr. Doppeldrossel
6 Spulenkern
7 Spulenhalterung
8 Ableitungen
9 Stutzen für Kühlluft-Zufuhr

Abb.10. Induktiver Indikator mit aus dem Vollen herausgearbeiteter Membran
1 Gehäuse
2 Spulenhalterung
3 Ankerfortsatz
4 Scheiben aus Weicheisen
5 Anker aus Weicheisen
6 Hülse aus Weicheisen
7 Isolation mit Ableitungen
8 Differential-Drosselspule

Abb. 11. Elektrische Trägerfrequenz-Brückenschaltung mit Verstärkereinrichtung und Gleichrichterbrücke für induktiven Indikator
1 Tauchanker
2 Membran
3 Doppel-Drossel
4 Verstärker
5 Gleichrichterbrücke
6 Röhren-Summer
7 Brücke
8 Oszillograph
9,10: feste Widerstände
11 einstellbarer Widerstand
12 Widerstand zum Verstimmen der Brücke

Abb. 12. Schnitt durch das MIT-Klopfanzeigegerät
1 Meßspule
2 Weicheisenkern
3 Stahlmembran
4 Spule für Magnetfeld
5 Isolierstück für Stromzuführung
6 Aluminiumträger
7 Gehäuse
8 Kühlluftzuführung

Abb. 13. Geberkondensator für oszillierende Brücke (nach Schnauffer)
1 Isolierring
2 Hauptmembran
3 Gehäuse
4 Abdichtmembran
5 Übertragungsstempel
6 Elektrodenzuführung

Abb. 14. Meßschaltung der halben Resonanzkurve nach Riegger

Abb. 15. Philips Druckaufnehmer GM 5561

Abb. 16. Schematische Darstellung der Brückenschaltung für Philips Druckaufnehmer nach Abb. 15
Zahlenerklärung siehe Abb. 17

Abb. 17. Meßbrückenschalter für den kapazitiven trägerfrequenzgespeisten Druckindikator von Philips
1 Indikator mit Hochfrequenz-Transformatoren T_1, T_2
2 Kathodenstrahl-Oszillograph-Ausgang mit Trägerfrequenz und Verstärker sowie Thomsenbrücke zum Nullabgleich
3, 4, 5, 6 Brücken-Kapazitäten
7, 8 Hochfrequenz-Transformatoren

Abb. 18. Skizze des Trägerfrequenz-Meßbrücken-Verstärkers für kapazitiven Druckindikator nach Abb. 19
1 Summer
2 Brücke
3 Verstärker u. Gleichrichter
4 Oszillograph
5 Kabel mit konstanter Kapazität
6 Geber

Abb. 19. Kapazitiver Druckindikator
1 Gehäuse
2 Elektrode
3 Isolation mit hoher Dielektrizitäts-Konstanten
4 Isolation

Abb. 20 Springstab-Indikator
1 Membran
2 Aufspring-Stab
3 Kontakt
4 Lampe
5 Einstellschraube
6 Elektroden

Abb. 21. Pv-Diagramm eines klopfenden Motors

Abb. 22. Mittelwerts-Diagramm im Zustand des Klopfens bei verschiedenen Verdichtungen

Abb. 23. Klopf-Diagramme, aufgenommen mit dem I.G.-Klopfmeßgerät bei verschiedenen Verdichtungen
1: = 4,2; 2: = 4,4; 3: =4,8

Abb. 24. Schaltung des I.G.-Klopfmeßgeräts mit Thermo-Umformer

Abb. 25. Schaltung des I.G.-Klopfmeßgeräts mit RC-Glied
1 Eingang
2 Erde
3 Ausgang
4 Ausgang Instrument
5 Instrument

Abb. 26. Eichkurven für den I.G.-Prüfmotor
——— aufgenommen mit Springstab-Indikator
——— aufgenommen mit Quarzdose

Abb. 27. Elektrische Schaltung, Verstärkung und Aufnahme bei Verwendung des Indikators nach Abb. 9 und 10 als Klopfmeßgerät
1 Membran
2 Verstärker
3 Braunsches Rohr
4 Filmkamera
5 Batterie
6 Widerstand
7 Drossel
8 Strommesser
9 Kondensator
10 Widerstand

Abb. 28. Aufzeichnungen des induktiven Klopfmeßgeräts nach Abb. 27 bei verschiedenen Verdichtungen
a) Klopfbeginn nach Gehör = 6,62
b) = 5,7 (Oktan 64) im CFR-Motor

Abb. 29. Messung des absoluten Klopfbeginnes im CFR-Motor Kraftstoff CZ 87, Drehzahl 600 U/min, Luftüberschußzahl 0,9, Verdichtungsverhältnis 6,5 : 1

Abb. 30. Schema einer elektrischen Differentiationseinrichtung
1 Meßimpuls $\frac{dp}{dt}$ 2 Ausgangs-Spannung entspricht $\frac{d^2p}{dt^2}$
2 Heizung

Abb. 31. Meßstreifen mit selbsttätiger Aufzeichnung der Druckbeschleunigung
1 Nr. der Messung
2 Ladedruck in mmHg
3 Klopfbeginn

Abb. 32. Amplitudenverhältnisse der einzelnen Druckfunktionen bei verschiedenen Überladungen (Augenblickswerte) CFR-Motor; Prüfkraftstoff: Fliegerbenzin

Abb. 33. Schema eines Temperatur-Meßstopfens
1 Zum Spiegel-Galvanometer

Abb. 34. Temperatur-Meßstopfen für Zündkerzenbohrung

Abb. 35. Oktanzahlbestimmung durch Eingabelung des zu untersuchenden Kraftstoffes
1 Verdichtungsverhältnis
2 Temperatur (Vergleichszahl)
OZ = Oktanzahl

Abb. 36. Abnahmedose am Zylinderkopf eines luftgekühlten Flugmotors

Abb. 37. Gesamtschwingungs- und Teilfrequenz-Oszillogramme, abgenommen am Zylinderkopf eines klopfenden CFR-Motors
1 Zündpunkt

Abb. 38. Gegenüberstellung der Gesamtschwingung und einzelner Teilfrequenzen eines klopffreien und eines klopfenden CFR-Motors
1 Zündpunkt

Abb. 39. Betriebsdämpfungen des Oktavsiebes für 2 x 8 Oktaven von Siemens & Halske

Abb. 40. Schwingungs-Aufnahmen der Schwingungen eines gekapselten Einzylindermotors, am Lagerschild abgetastet

Abb. 41. Akustische Aufnahmeapparatur für Versuche an Fahrzeugen

Abb. 42. Schema einer akustischen Aufnahmedose
1 Quarzgeber in Hülse vorgespannt
2 Masse
3 Sützmembran

Abb. 43. Klopfbilder am Einzylindermotor bei verschiedenen Verdichtungen

Abb. 44. Klopfkurven verschiedener Benzine
1 OZ 60
2 Rumänisches Erdöl-Benzin
3 OZ 70

Abb. 45. Während der Fahrt aufgenommene Geräuschbilder eines Vierzylindermotors
1 40 km/h 1/4 Gas
2 50 km/h, 1/2 Gas
3 60 km/h, 1/1 Gas
Vorzündung 50

Abb. 46. Klopfbilder vom Einzylinder-Flugprüfmotor

Abb. 47. Kapazitative Beschleunigungsaufnahmedose

1 Membran
2 Masse
3 Isolierung
4 Elektrode
5 Massenelektrode
6 Bodenstück des Gehäuses
7 Oberteil des Gehäuses

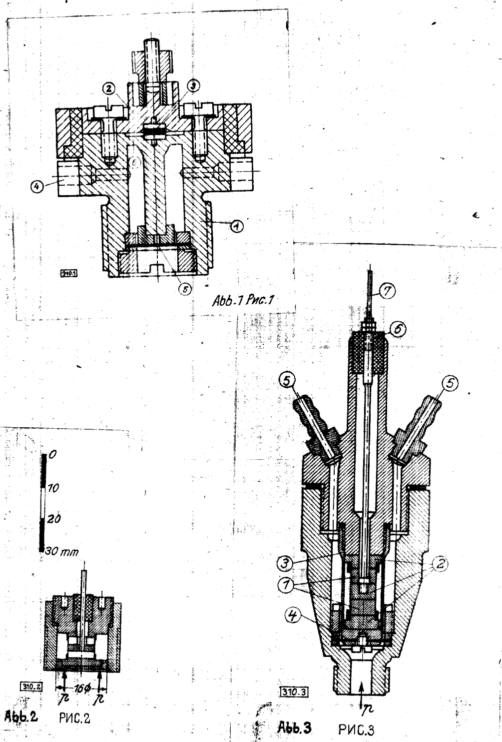


Abb.1 Рис.1

Abb.2 РИС.2

Abb.3 РИС.3

Abb. 6 Рис. 6

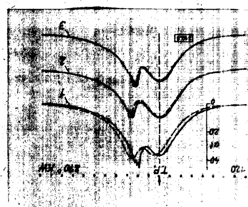


Abb. 5 Рис. 5

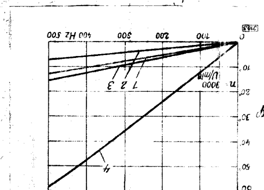
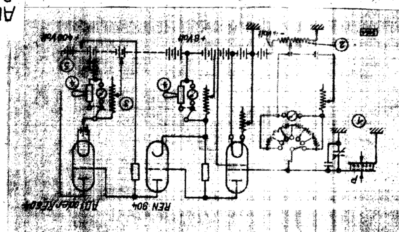


Abb. 4 Рис. 4



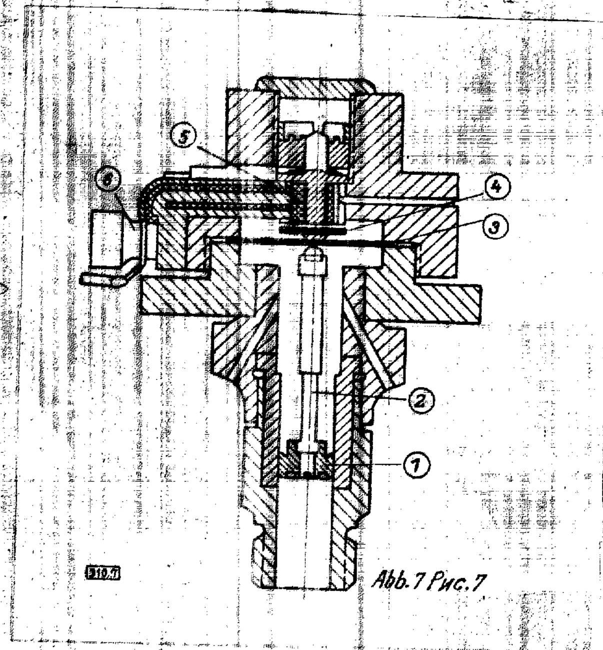


Abb.7 Рис.7

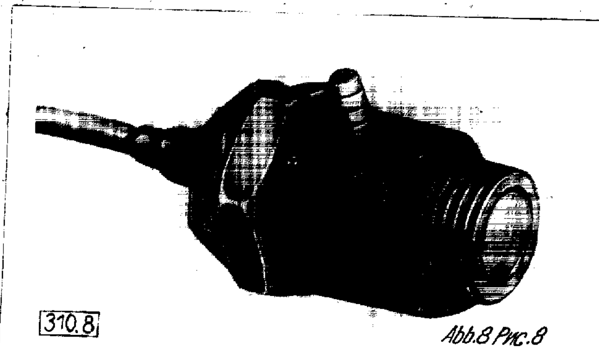


Abb.8 Рис.8

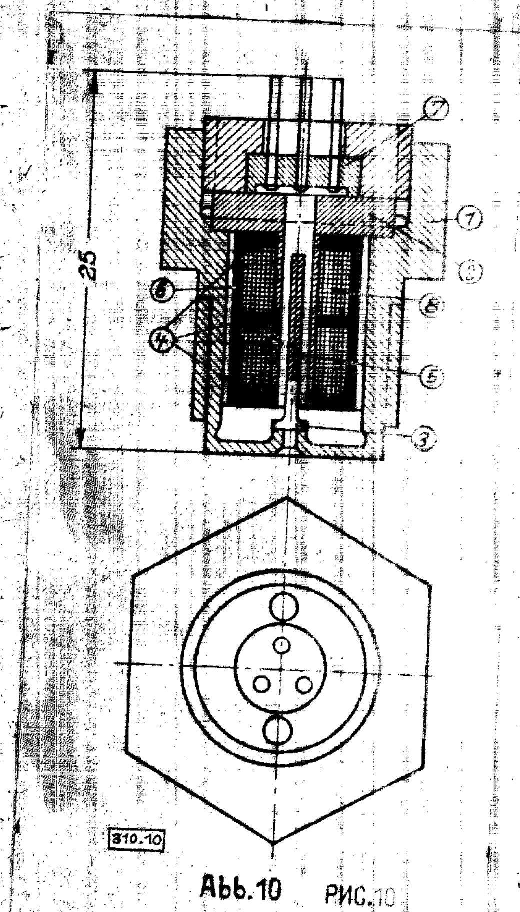
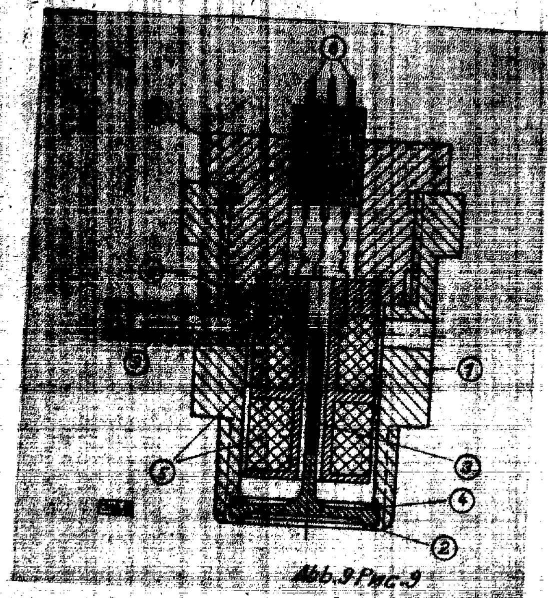
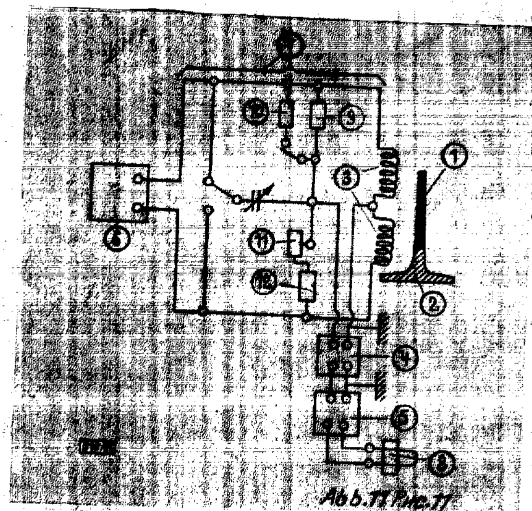


Abb.10 РИС.10


Abb.9 Рис.9


Abb.11 Рис.11

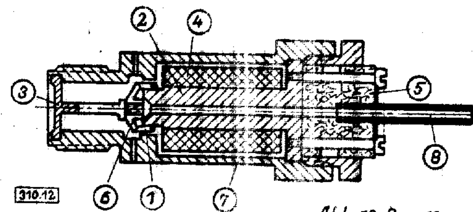


Abb. 12 Рис. 12

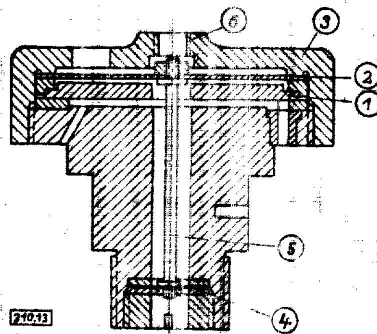


Abb. 13 Рис. 13

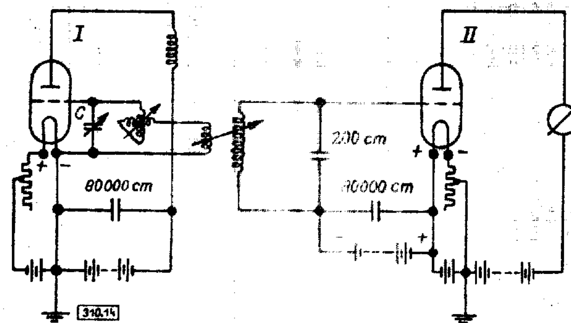


Abb. 14 Рис. 14

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

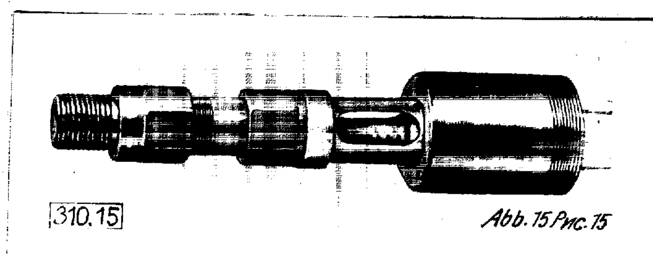


Abb. 15 Рис. 15

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

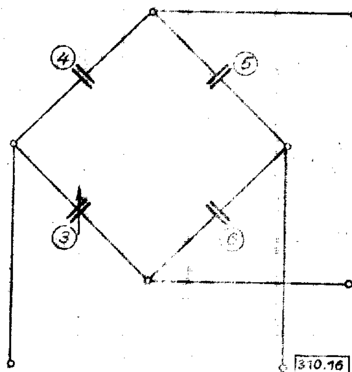


Abb. 16 РИС.16

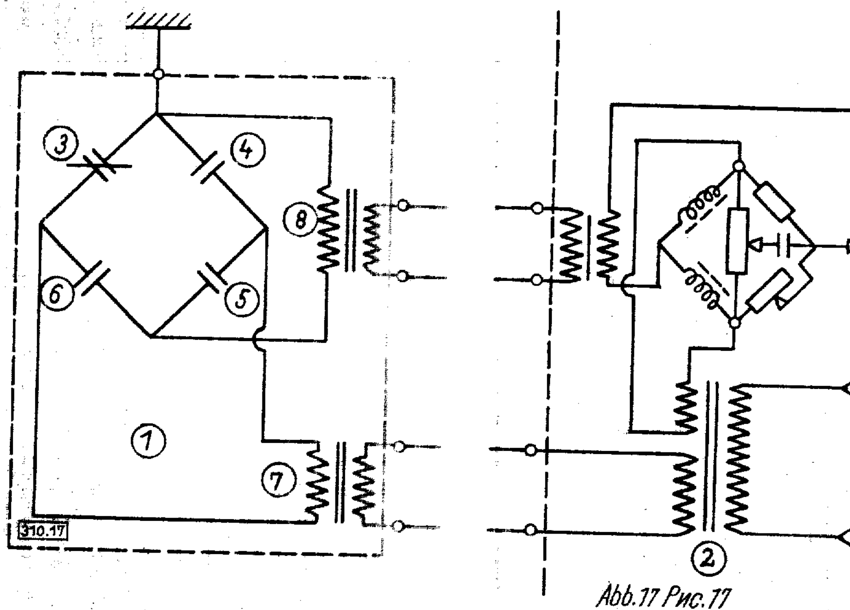


Abb.17 Рис.17

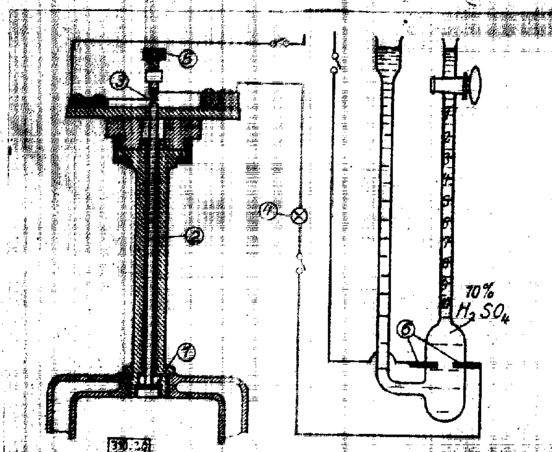


Abb.20 РИС.20

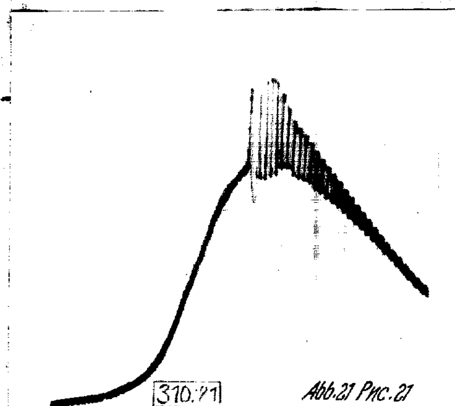


Abb.21 Рис.21

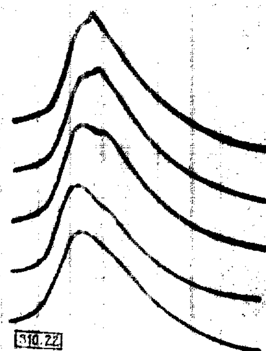


Abb.22 РИС.22

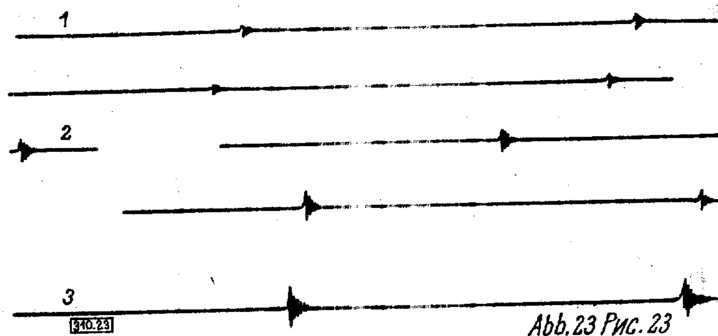


Abb.23 Рис. 23

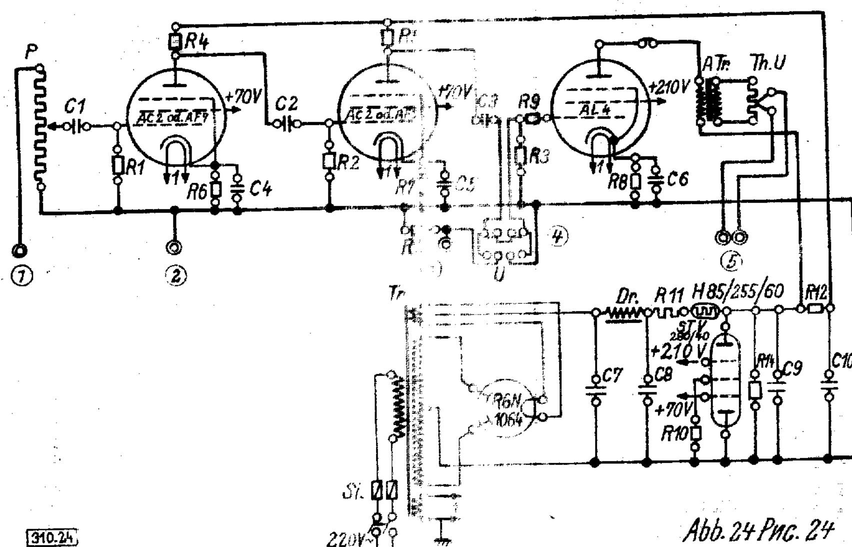


Abb.24 Рис. 24

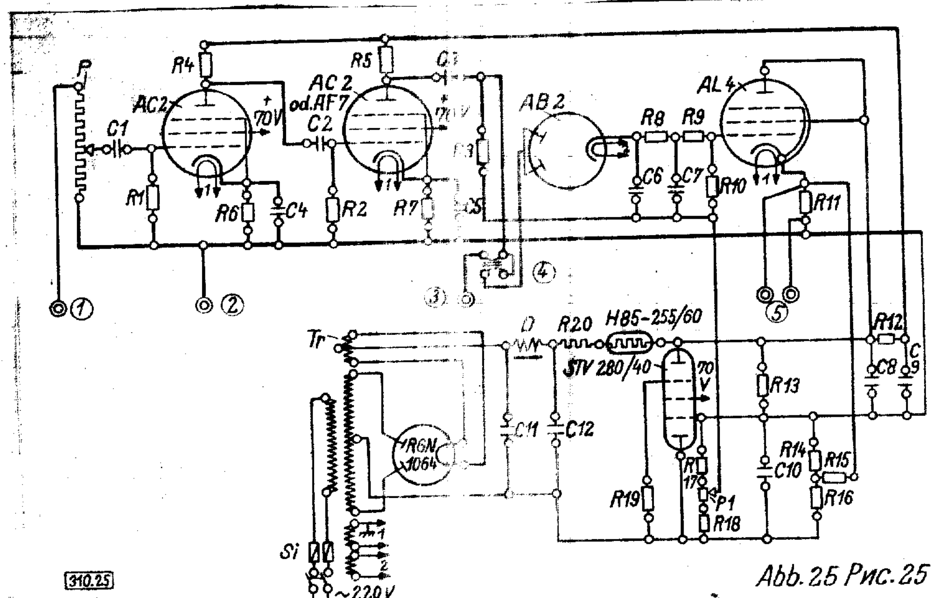
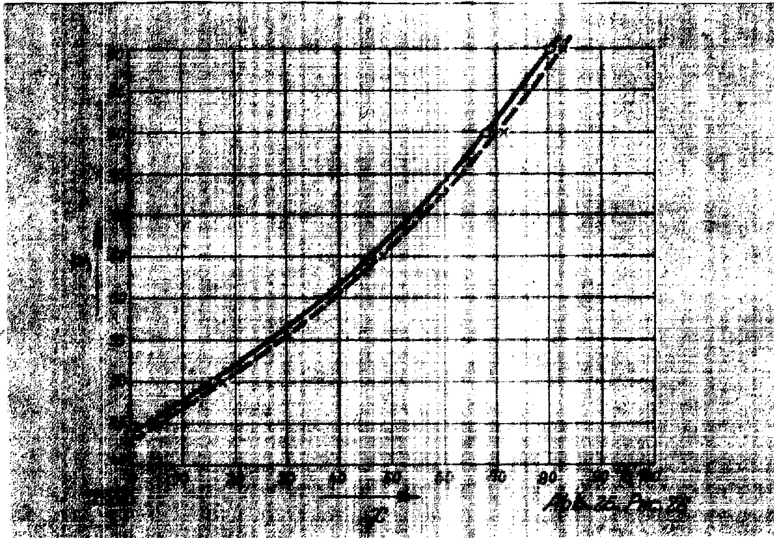
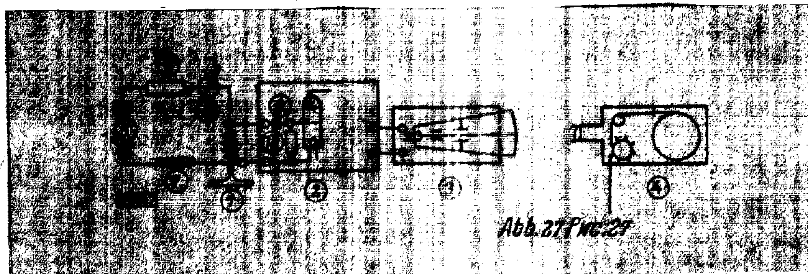
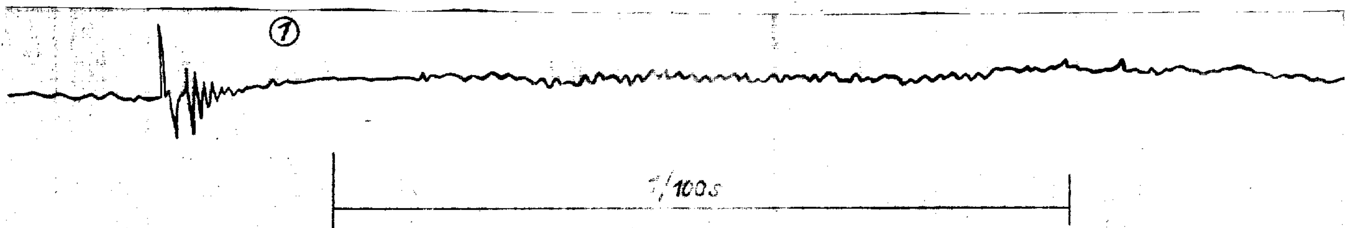


Abb.25 Рис.25


Abb. 26 Рис. 26


Abb. 27 Рис. 27



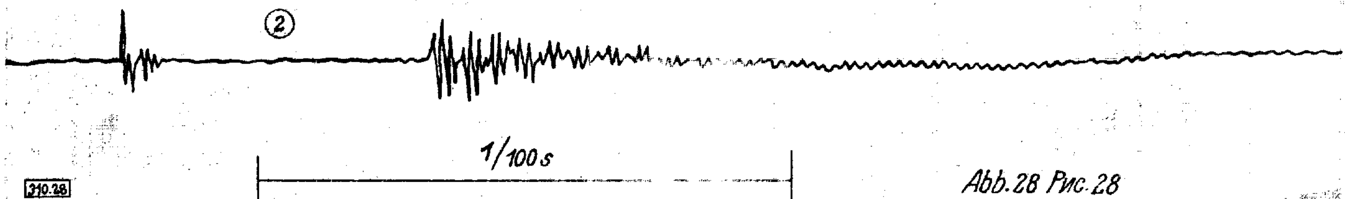
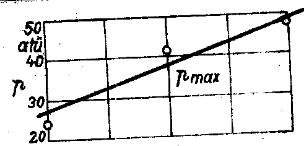


Abb. 28 Рис. 28



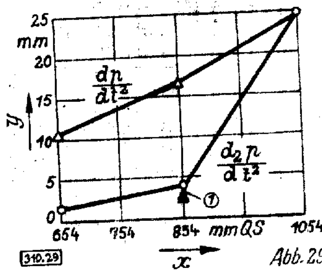


Abb.29 Рис.29

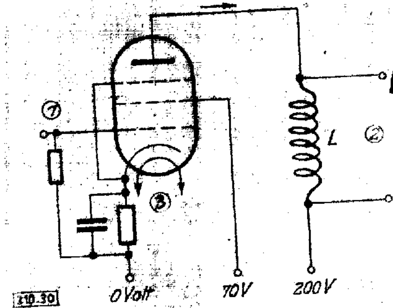


Abb.30 РИС.30

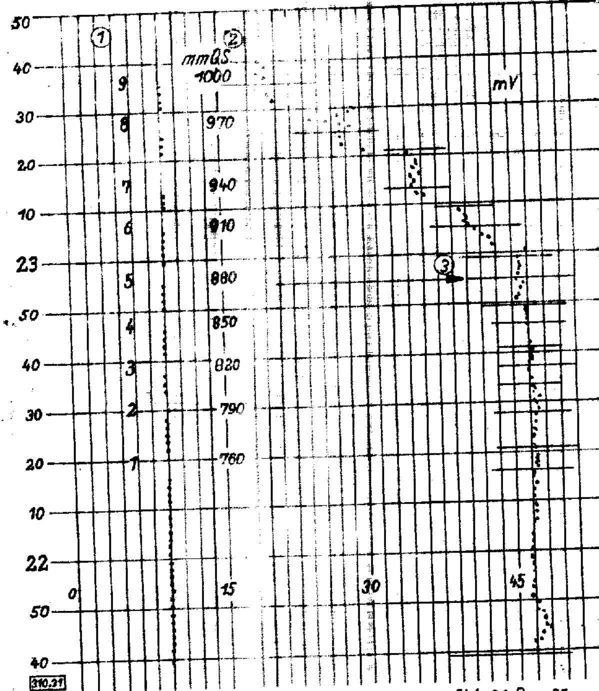
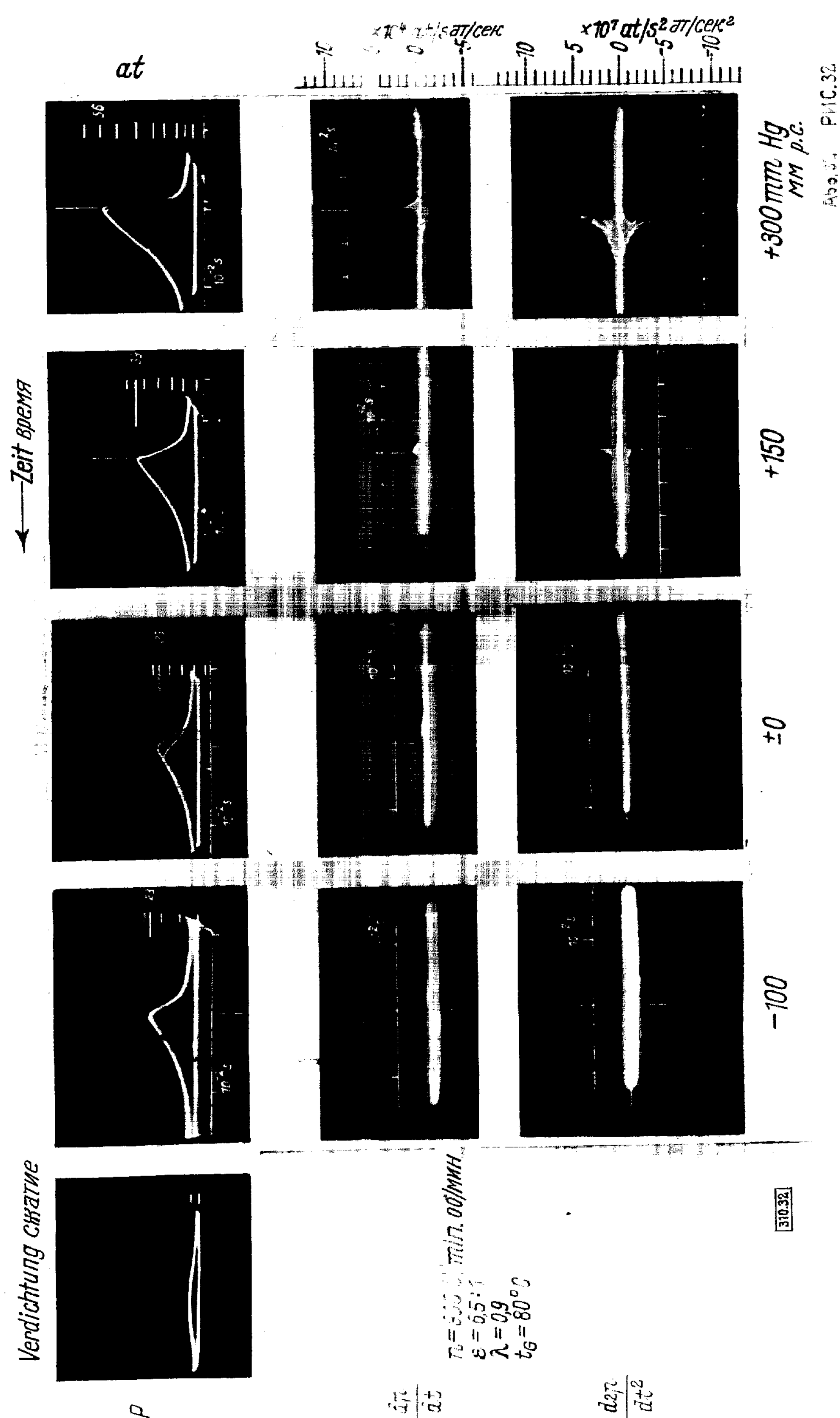


Abb.31 Рис 31



at
x10⁴ at/s ат/сек
x10⁷ at/s² ат/сек²
Zeit время
Verdichtung сжатие
+300 mm Hg
мм р.с.
+150
±0
−100
Рис.32
min. об/мин
ε = 6,5:1
λ = 0,9
t_G = 80°C
310.32
p

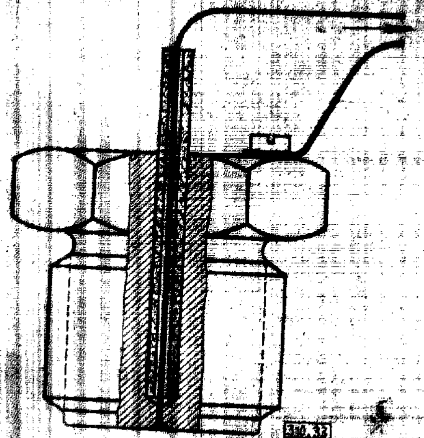


Abb. 33 РИС.33

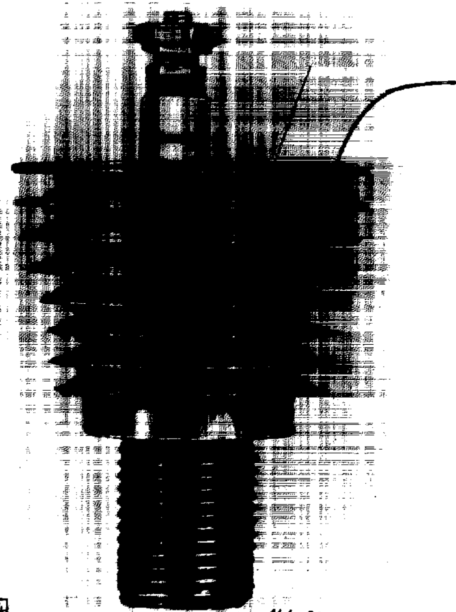


Abb.34 Рис.34

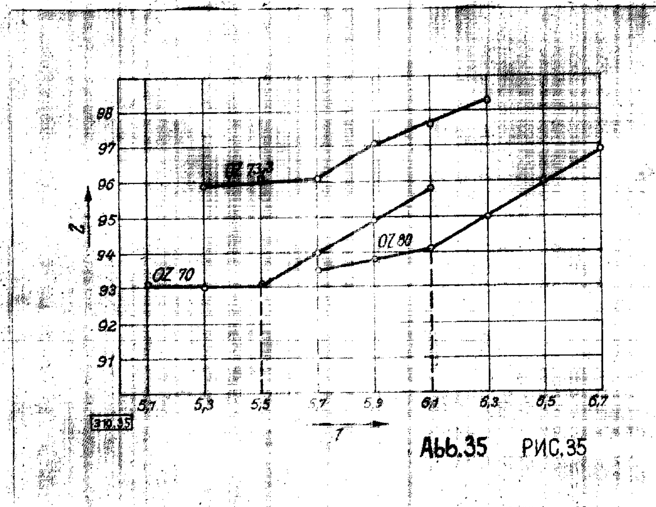


Abb.35 РИС.35

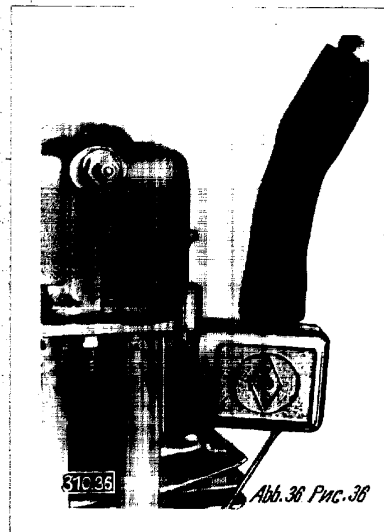


Abb.36 Рис.36

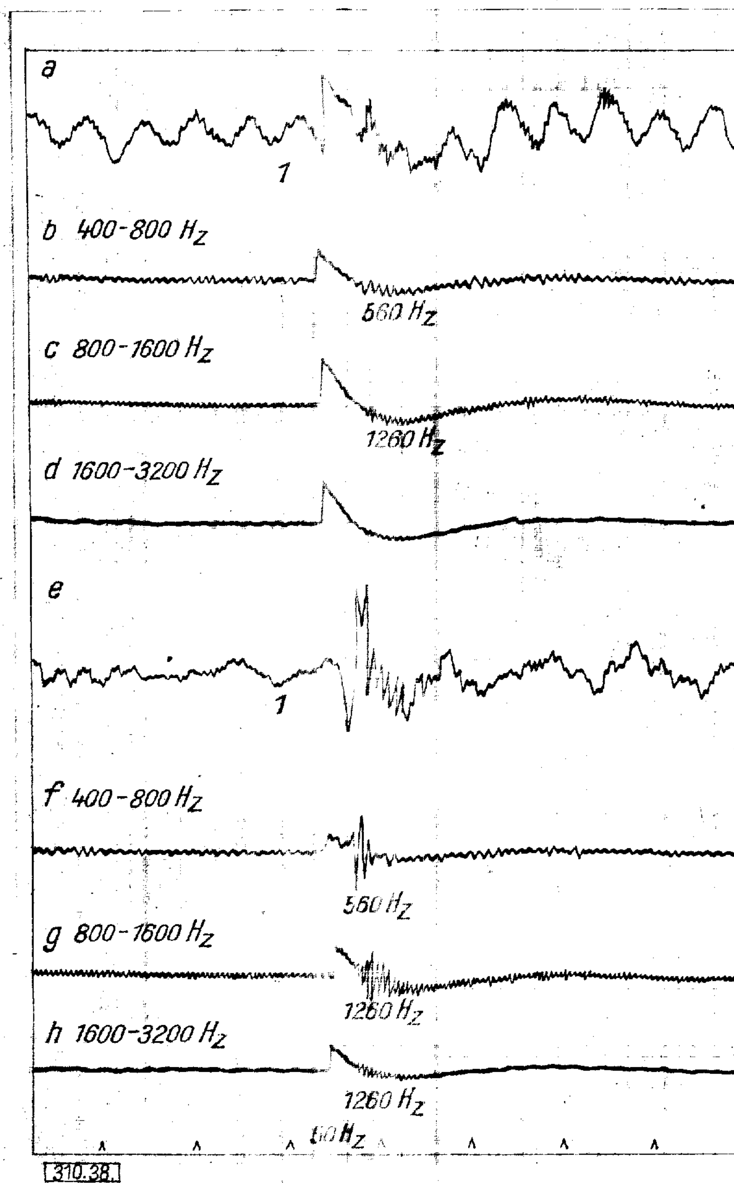

a
1
b 400-800 Hz
560 Hz
c 800-1600 Hz
1260 Hz
d 1600-3200 Hz
e
1
f 400-800 Hz
560 Hz
g 800-1600 Hz
1260 Hz
h 1600-3200 Hz
1260 Hz
60 Hz
310.38

Abb.38 РИС.38

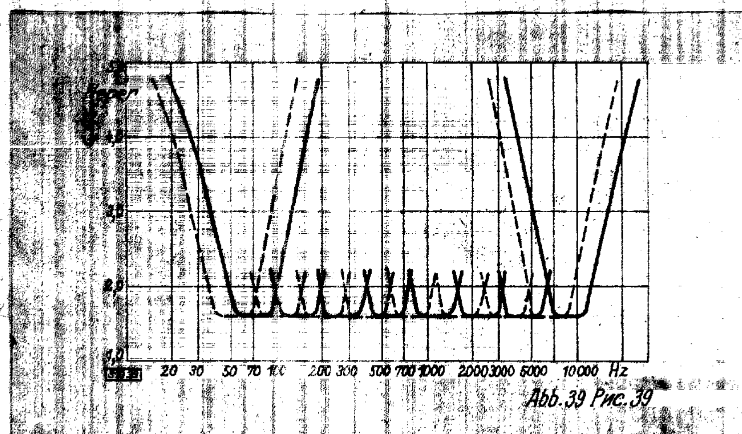


Abb.39 Рис.39

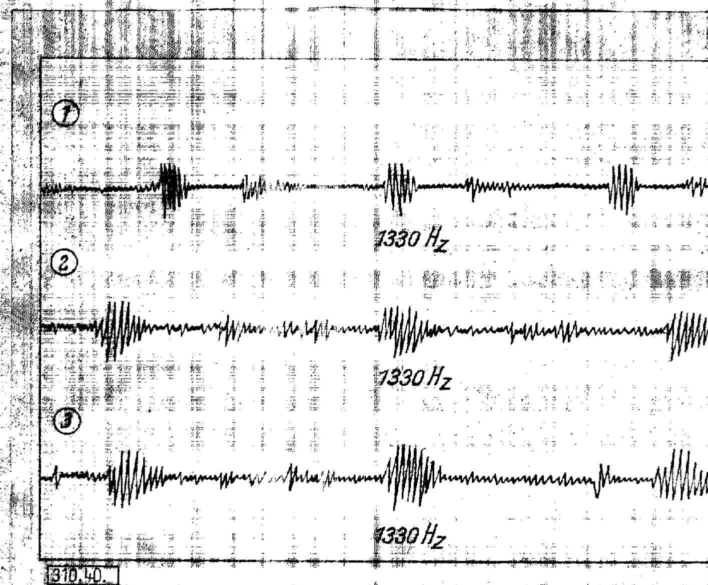
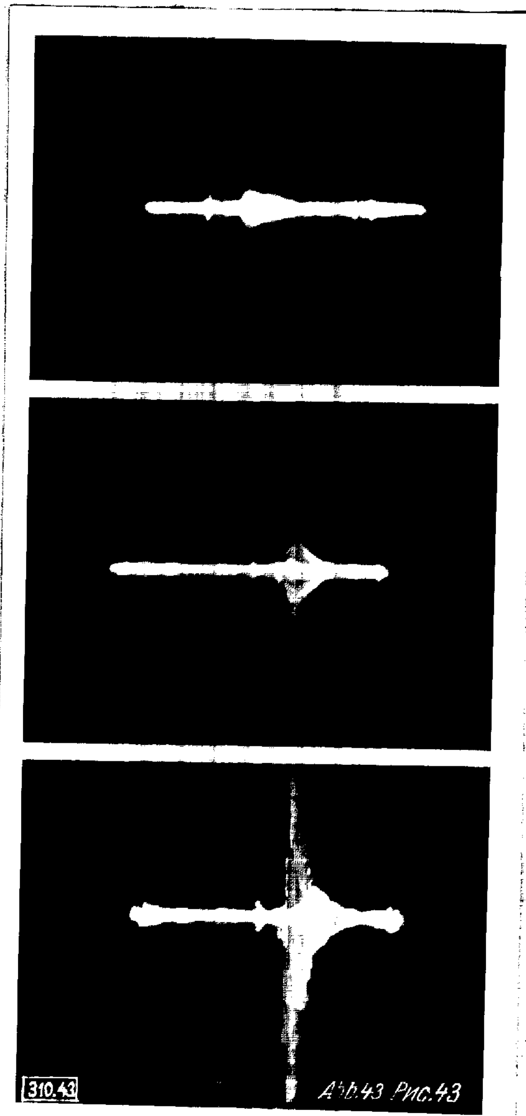


Abb.40 РИС.40


310.43
Abb.43 Рис.43

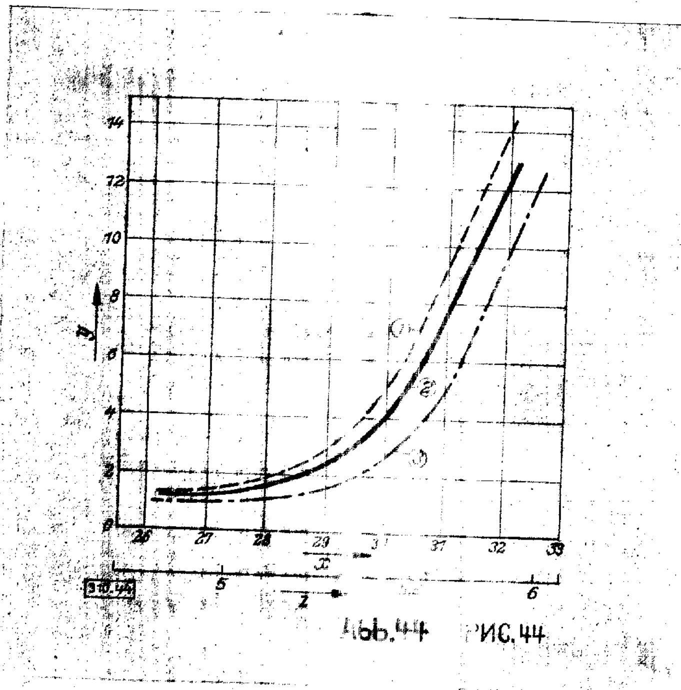


Abb.44 РИС.44

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



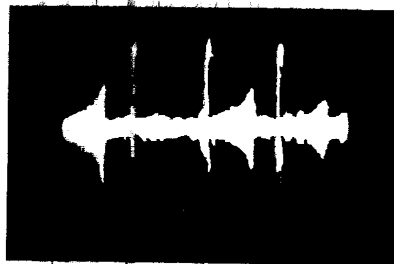
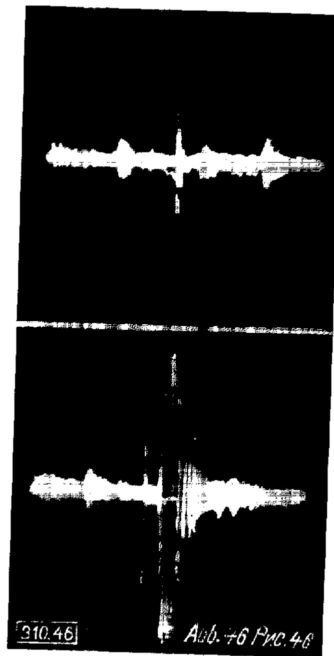




Abb.45 Рис.45



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

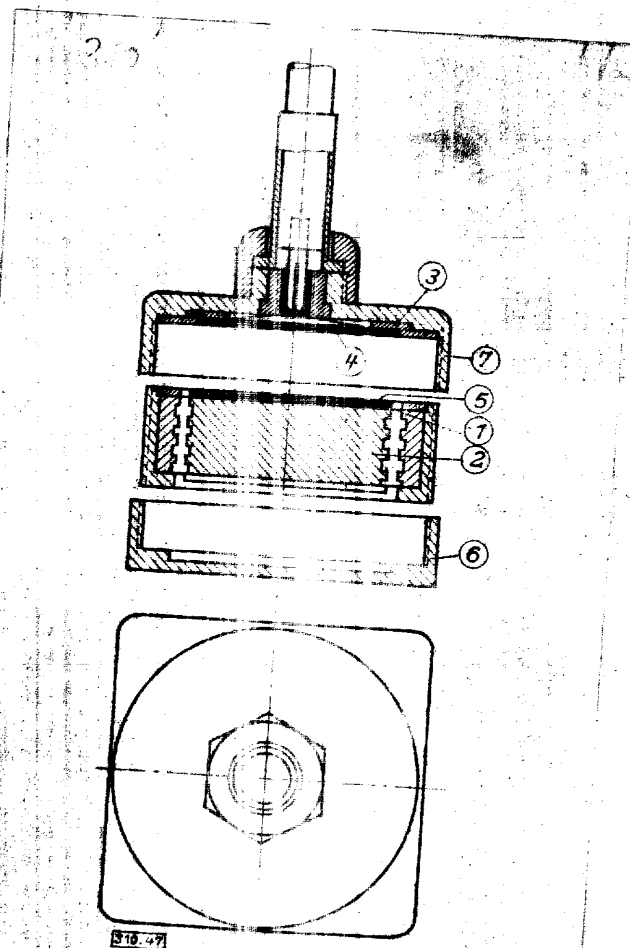


Abb.47 РИС.47

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

Stellungnahme des Berichtsbetreuers

zum Bericht Nr. 225, thernat. Kennziffer ID/2c

Klopffestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse und ungelöste Aufgaben der Forschung)

Verfasser: Ing. Dr. techn. Dr. jur. B. Riediger
Berichtsbetreuer: Prof. Dr.-Ing. R. Drawe

Der Bericht gibt anhand des vorliegenden Schrifttums eine Darstellung der Forschungstätigkeit und der dabei gewonnenen Erkenntnisse über die Klopffestigkeit und die Zündwilligkeit. Der Bericht gewinnt an Wert durch die Stellungnahme des Verfassers zu den im Schrifttum niedergelegten Auffassungen; er betont mit Recht die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeit.

Ich bin der gleichen Ansicht; mir erscheint sicher, daß, vor allem bei Ottomotoren, das Bestreben herrschen wird, die Literleistung zu erhöhen, um geringere Leistungsgewichte zu bekommen. Das gegebene Mittel dazu ist die Erhöhung des Verdichtungsgrades. Bei Flüssiggas und Methan als Treibstoffen ist das ohne weiteres möglich, weil diese Kraftstoffe ausreichend klopffest sind. Die beim Betrieb mit ihnen erreichten Vorteile: geringerer Brennstoffverbrauch, besonders bei den Fahrleistungen, und geringeres Leistungsgewicht, wird man dann auch beim Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen anstreben; dazu ist aber erforderlich, das Auftreten von Klopferscheinungen zu verhindern.

Inhaltsangabe

zum Bericht Nr. 225, them. Kennziffer ID/2o

Klopffestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse und ungelöste Aufgaben der Forschung)

Verfasser: Ing. Dr. techn. Dr. jur. B. Riediger

Die Klopffestigkeit der Ottokraftstoffe und die Zündwilligkeit der Dieselkraftstoffe sind Eigenschaften, die an Bedeutung alle anderen überragen. Die Forschung bemühte sich schon frühzeitig, die Ursachen für das Klopfen von Ottomotoren festzustellen. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Kenntnis der Einzelheiten des Klopfvorganges. Um diese zu vertiefen, werden Aufzeichnungen des Druckverlaufes, seiner Änderungsgeschwindigkeit und -beschleunigung, analytische Untersuchungen der Umsetzungsprodukte in einzelnen Phasen des Verbrennungsvorganges sowie spektroskopische Beobachtungen benutzt. Ähnlich liegen die Aufgaben bei der Erforschung des Verbrennungsvorganges im Dieselmotor. Bei diesem wird jedoch der Gesamtablauf außer durch den in erster Linie von chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes abhängigen Zündverzug auch durch die Art der mechanischen Aufbereitung des Gemisches wesentlich beeinflußt; hierbei spielen die Strömungsgeschwindigkeiten, der Grad der Durchwirbelung und ähnliche physikalische Vorgänge eine wesentliche Rolle.

Es hat sich gezeigt, daß eindeutige Zusammenhänge zwischen der Klopffestigkeit oder der Zündwilligkeit und dem chemischen Aufbau der als Kraftstoffe verwendeten Kohlenwasserstoffe sowie einigen Abkömmlingen dieser Verbindungen bestehen. Daher ist es für jeden, der sich mit diesen Fragen näher befaßt, zweckmäßig, über die wichtigsten Forschungsergebnisse, welche die Strukturchemie, die Reaktionskinetik und die che-

mische Thermodynamik bieten, unterrichtet zu sein.

Nachdem die aus den Notwendigkeiten der Praxis geborenen motorischen Prüfverfahren sowohl für Otto- als auch für Dieselkraftstoffe vereinheitlicht sind und die erzielte Meßgenauigkeit eine beachtliche Höhe erreicht hat, erscheint es zweckmäßig, den Schwerpunkt der Forschung in eine weitere Aufhellung der theoretischen Zusammenhänge zu verlegen. Daneben bleibt für die Praxis das Ziel, die jetzt übliche Bewertung der Kraftstoffe durch Oktan- oder Zetanzahl so zu erweitern, daß ihr Verhalten in Bezug auf Klopffestigkeit oder Zündwilligkeit auch bei Änderung von Betriebskenngrößen erfaßt wird. Ein solcher Vorschlag liegt in dem Überladeverfahren der DVL für sehr klopffeste Fliegerkraftstoffe vor. Desgleichen erscheint es erstrebenswert, die Zusammenhänge zwischen der Klopffestigkeit oder der Zündwilligkeit und der Eignung der Kraftstoffe für die weitergehenden Beanspruchungen des Fahrbetriebes zu ermitteln, eine Aufgabe, die sicherlich nur durch eine Mehrpunktbewertung in sinngemäßer Anwendung des DVL-Verfahrens erreicht werden kann.

Neben den motorischen Prüfverfahren gibt es eine Anzahl von Bewertungsverfahren, mit Hilfe chemisch-physikalischer Kenngrößen die Klopffestigkeit oder die Zündwilligkeit zu bestimmen. Ihre Zuverlässigkeit ist gewöhnlich bei Kraftstoffen, deren Zusammensetzung Besonderheiten aufweist, gering, also nicht unter allen Umständen verbürgt. Trotzdem hat sich z.B. die Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen aus der Dichte und der Siedekennzahl im allgemeinen bewährt. Es ist damit zu rechnen, daß bei einer Erweiterung der Kenntnis der chemisch-physikalischen Gesetze des Verbrennungsablaufs im Motor auch auf diesem Gebiete Fortschritte erzielt werden, welche die motorische Prüfung wenigstens in geringem Umfang entbehrlich machen können.

Inhaltsverzeichnis

- - - - -

I. Gesicherte Erkenntnisse über Klopffestigkeit und Zündwilligkeit von Motorkraftstoffen

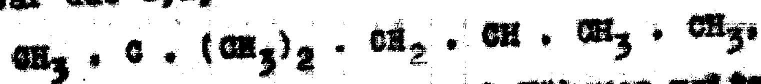
1. Die Anfänge der Klopfwert- und Zündwilligkeitsprüfung bei Otto- und bei Dieselmotoren

Das Klopfen, das bei hochbelasteten und mit ungeeignetem Kraftstoff betriebenen Verbrennungsmotoren beobachtet wird, ist eine schon lange bekannte Erscheinung. Sie ist besonders von den Kraftfahrern gefürchtet und macht sich durch einen empfindlichen Leistungsabfall und ein Geräusch bemerkbar, das dieser Erscheinung den Namen gegeben hat. Es tritt sowohl bei Otto- als auch bei Dieselmotoren auf; doch soll gleich einleitend betont werden, daß diese beiden Fälle trotz ihrer äußeren Ähnlichkeit einer getrennten Betrachtung bedürfen. Es sind die Verschiedenheiten zwischen den zum Klopfen neigenden Kraftstoffen beim Ottomotor und beim Dieselmotor so groß, ihre Verbrennungseigenschaften von so entgegengesetzter Art, daß es das Verständnis nur erschwert, wenn die Unterschiede nicht von vornherein beachtet werden. Daher sollen die Bezeichnung "Klopfen" und die damit zusammenhängenden Begriffe wie Klopffestigkeit (nämlich der Kraftstoffe), Gegenklopfmittel und Ähnliches nur für den Bereich des Ottomotors angewendet werden. Was beim Dieselmotor zu einem dem Klopfen des Ottomotors ähnlichen Verhalten führt, wird vornehmlich durch mangelnde Zündwilligkeit - zu großem Zündverzug - der verwendeten Kraftstoffe verursacht. Deshalb hat es sich seit langem eingebürgert, diesen Begriff bei der Betrachtung der Vorgänge im Dieselmotor in den Vordergrund zu stellen. Durch die Wahl der Ausdrücke ergibt sich somit eine klare Trennung zwischen den beiden Fällen.

Das Klopfen von Ottomotoren in der heute geläufigen Bedeutung wurde als einheitlich zu beurteilende Erscheinung im Verlaufe des ersten Weltkrieges erkannt, als durch die sprunghafte Entwicklung unter dem Druck der Kriegsführung der Moto-

rambau, insbesondere für Fahr- und Flugzeuge, eine bis dahin unbekannte Höhe erreichte. Es war Harry R. Ricardo, der unmittelbar nach Beendigung dieses Krieges an eine systematische Erforschung des Vorganges heranging und klar erkannte, daß das Klopfen vornehmlich von der Form des Verbrennungsraumes, der Höhe des Verdichtungsverhältnisses, ganz besonders aber von der Art des verwendeten Kraftstoffes abhängt [1]. 1)

Ricardo verwendete auch als erster für die Untersuchung verschiedener Kraftstoffe einen wassergekühlten Einzylinder-Viertaktmotor mit etwa 2,1 l Hubraum als Prüfmotor und änderte während des Laufes das Verdichtungsverhältnis in den Grenzen zwischen 1 : 3,7 und 1 : 8. Er bewertete die untersuchten Kraftstoffe nach dem höchsten nutzbaren Verdichtungsverhältnis (highest useful compression ratio, HUCR), dem Wert, bis zu dem das Verdichtungsverhältnis gesteigert werden kann, ohne daß sich Klopfen einstellt. Damit war ein Maß gewonnen, das bei Wiederholung der Versuche nur wenig streute und sich für Vergleichsmessungen eignete. Die wesentlichen Gedanken der von Ricardo vorgeschlagenen und durchgeführten motorischen Klopfwertprüfung hat man bis heute beibehalten können. Allerdings wird nicht mehr das höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis zur Kennzeichnung der Kraftstoffe benutzt, sondern die Oktanzahl, die auf das als Standard-Kraftstoff verwendete i-Oktan und zwar das 2,2,4-Trimethylpentan



$$CH_3 \cdot C \cdot (CH_3)_2 \cdot CH_2 \cdot CH \cdot CH_3 \cdot CH_3,$$

Bezug nimmt. Hierüber folgt noch Näheres weiter unten.

Ricardo hat ursprünglich das Verhalten der untersuchten Kraftstoffe mit einem Gemisch verglichen, das er aus einem klopffreudigen, von Aromaten befreiten Benzin und aus Toluol (Methylbenzol) $C_6H_5 \cdot CH_3$ herstellte. Er bezeichnete dann als Toluolzahl den in Prozenten ausgedrückten Volumenanteil des Toluols in einem solchen Gemisch, das dasselbe höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis aufwies, wie der untersuchte Kraftstoff.

1) Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttum am Ende der Arbeit.

Auch beim Dieselmotor war es vornehmlich der Fahrzeugmotor mit seinen hochentwickelten Bauformen, der dazu drängte, die dem Klopfen des Ottomotors ähnlichen Erscheinungen zu klären. Da jedoch die Verwendung von Dieselmotoren für Fahrzeuge jüngeren Datums ist, wurde mit einer systematischen Untersuchung erst viel später begonnen. Anfang der 30er Jahre unseres Jahrhunderts waren es zunächst die Arbeiten von P. Dumanois [2] sowie von G. D. Boerlage und J. J. Broeze [3], welche es unternahmen, in Motoren für Klopfwertprüfung die Eignung von Dieselkraftstoffen zu untersuchen. Es kommt dabei, wie schon erwähnt, vor allem auf die Zündwilligkeit an. Auf Vorschlag der beiden zuletzt genannten Forscher wurde auf der Welt-Erdöltagung 1933 zunächst die Zetenzahl als international anerkannter Maßstab für die Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen angenommen. Sie drückte - ähnlich wie die Oktanzahl - wie später noch ausführlicher zu erörtern sein wird, - den Raumanteil eines Vergleichskraftstoffes an dem sehr zündwilligen Zeten, einem einfach ungesättigten Kettenkohlenwasserstoff, aus. Sie wird jedoch wegen der Unbeständigkeit des Zetens heute durch die auf Zetan (den entsprechenden gesättigten Kohlenwasserstoff) bezogene Zetanzahl ersetzt.

Auf dem Gebiet der Prüfung der Dieselkraftstoffe war bis vor kurzem noch keine so weitgehende Vereinheitlichung wie bei Ottokraftstoffen erzielt, obwohl über die chemisch-physikalischen Zusammenhänge im Fall des Dieselmotors größere Klarheit besteht als beim Ottomotor. Dabei spielt offensichtlich die Tatsache eine Rolle, daß beim "Klopfen" des Dieselmotors die Zündwilligkeit alle anderen Einflüsse bei weitem überragt. Es ist daher auch noch mit voneinander abweichenden Verfahren eine im allgemeinen besser übereinstimmende Bewertung der Dieselkraftstoffe zu erzielen; bei den verwickelten Zusammenhängen, die das Klopfen des Ottomotors verursachen, muß hingegen die genaue Übereinstimmung aller Versuchsbedingungen peinlich beachtet werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

2. Einzelheiten des Klopfvorganges beim Ottomotor

a. Verlauf der klopfenden Verbrennung

Das wesentliche Merkmal der klopfenden Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches ist die Tatsache, daß sich die Flammenfront von der Zündstelle aus nicht gleichmäßig fortbewegt, sondern daß vor Erreichung der äußersten Punkte des Verbrennungsraumes der Rest der Ladung mit einer wesentlich höherem Geschwindigkeit verbrennt, als dies unter normalen Verhältnissen bei dem gegebenen Kraftstoff-Luft-Gemisch der Fall ist [4]. Das Klopfen wird von Temperatur- und Druckänderungen begleitet, welche von dem angestrebten Verlauf abweichen und sich auf den Betrieb des Motors ungünstig auswirken. Als kennzeichnend für den Unterschied zwischen klopfender und nicht klopfender Verbrennung sei Abb. 1 a und b nach H. Nielsen [5] wiedergegeben. Es zeigt den Verlauf des Druckes über der Zeit und gleichzeitig aufgezeichnete Schwingungen der Gasmasse im Verbrennungsraum. Wie daraus zu ersehen ist, erreicht die Druckspitze nicht nur wesentlich höhere Werte als bei nicht klopfendem Betrieb, sondern noch entscheidender ist der durch die Tangente, mathematisch durch den Differentialquotienten erfaßte Druckanstieg, der erhebliche mechanische Beanspruchungen des Triebwerkes zur Folge hat. Auf eine ausführliche Wiedergabe aller diesbezüglichen Untersuchungen und Messungen kann hier unter Hinweis auf Kapitel 12 des Buches von W. Jost [6] verzichtet werden, weil sich dort eine eingehende Darstellung der vor 1939 durchgeführten Arbeiten findet.

Ohne schon hier auf die noch ungeklärten Fragen bei der Beurteilung der Ursachen des Klopfens einzugehen, sollen Ergebnisse einer Arbeit kurz erwähnt werden, die wohl 1938 veröffentlicht, von Jost aber nicht mehr näher berücksichtigt wurde. Ein nicht unerheblicher Teil der Forscher vertritt nämlich die Ansicht, daß Untersuchungen am Motor wenig geeignet sind, wesentlich zur Klärung des Klopfvorganges selbst beizu-

tragen, denn es spielen zu viele Nebenumstände eine Rolle; es sei deshalb kaum möglich, einzelne Einflüsse klarer herauszuschälen. Damit soll in keiner Weise der unzweifelhafte Vorzug der Untersuchungen am Motor für die praktische Ermittlung des Klopfwertes von Kraftstoffen verkannt werden, ebensowenig die Tatsache, daß die Auswirkungen baulicher Änderungen nur auf diese Weise ermittelt werden können. Die erwähnte Forschungsrichtung versucht daher, durch Untersuchungen in Bomben größere Klarheit über Ursachen und den Verlauf der klopfenden Verbrennung zu erhalten.

So hat A. Köchling [7] im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden, das unter Leitung des inzwischen verstorbenen Prof. Dr. A. Nägel auf dem Gebiete der Motorenforschung führend war, Versuche an einer Bombe an chemisch reinen Kraftstoffen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluß der Luftüberschußzahl, des chemischen Aufbaues der Kraftstoffe, des Anfangsdruckes und der Anfangstemperatur sowie des Sauerstoffgehaltes der Luft und der Brenngeschwindigkeit besonders untersucht. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, die dem Druckverlauf überlagerte Klopfschwingung oszillographisch zu erfassen. Der größte Klopfschwingungs-Ausschlag, die mittlere Brenngeschwindigkeit und das größte Drucksteigerungs-Verhältnis abhängig von der Luftüberschußzahl ist beispielsweise für ein Pentan-Luft-Gemisch aus Abb. 2 zu ersehen.[2])

Es zeigt sich, daß (abgesehen von einer zwischen $\lambda = 0{,}7$ und $\lambda = 0{,}8$ durch das Auftreten einer Störschwingung hervorgerufenen Dämpfung der Klopfschwingung) die größten Ausschläge im Bereiche des größten Drucksteigerungsverhältnisses liegen. Ob die Klopfschwingung überhaupt nur auftritt, wenn das Drucksteigerungsverhältnis einen bestimmten Wert überschreitet, ist aus dem Bericht von Köchling nicht zu ersehen. Auffällig ist,

---

2) Leider fehlt in der Arbeit [7] die Angabe der Dimension des Drucksteigerungsverhältnisses. Sie läßt sich mangels eines Druckmaßstabes aus den dort wiedergegebenen Oszillogrammen nicht rekonstruieren. Die Ungenauigkeit bei der Beschriftung der Ordinaten in der Veröffentlichung ist bei der vorstehenden Wiedergabe berichtigt.

daß die Klopfschwingung in der Bombe bei Luftmangel und nur bei wenig über dem theoretischen Wert liegenden Luftverhältnissen auftritt, während im Gegensatz dazu im Motor das Klopfen mit zunehmendem Luftüberschuß meist stärker wird. Sonach bleibt noch zu klären, welche Einflüsse im Motorbetrieb diese Verschiebungen verursachen. Die Klopfschwingung war nicht nur bei dem als Beispiel erwähnten Pentan-Luft-Gemisch, sondern auch bei einer Reihe anderer Kohlenwasserstoffe, außerdem bei Äthylalkohol, zu beobachten.

Die Unterschiede im Verhalten von Kraftstoffen mit stark voneinander abweichender Klopffestigkeit sind aus Abb. 3 zu ersehen, welche neben dem bereits in Bild 2 wiedergegebenen Verlauf der Klopfschwingungs-Ausschläge für Pentan den für Benzol zeigt. Es liegt die Vermutung nahe, daß sich die vorerwähnte Störschwingung gerade dort am stärksten bemerkbar macht, wo der Höchstwert des Ausschlages zu erwarten wäre. Immerhin ist aus dem Bild so viel zu erkennen, daß die Klopfschwingung bei gleichen Versuchsbedingungen im Bereich wesentlich niedrigeren Kraftstoff-Luft-Verhältnisses auftritt, also in merkbar größerem Abstand von dem bei praktischem Betrieb üblichen Verhältnis. Dies stimmt demnach mit der tatsächlich größeren Klopffestigkeit des Benzols überein. Wie sich die größeren Klopfschwingungs-Ausschläge mit dem Anfangsdruck ändern, ist in Abb. 4 wiedergegeben. Gegenüber dem stetigen Anstieg bei großem Luftüberschuß zeigen sich bei Luftmangel sehr starke Abweichungen von dem allgemeinen, ebenfalls ansteigenden Verlauf, die zunächst noch keine Rückschlüsse erlauben. Immerhin läßt sich feststellen, daß die dem Druckverlauf überlagerte Schwingung im Bereiche der beim Motorbetrieb üblichen Werte des Anfangsdruckes beträchtliche Größen erreichen kann. Dabei ist allerdings zu beachten, daß bei den von <u>Köhling</u> durchgeführten Versuchen die im Motor auftretenden hohen Temperaturen nicht angewendet werden konnten. Eine Steigerung der Temperatur im bescheidenen Maße, wie sie z.B. bei Versuchen mit einem Benzol-Luft-Gemisch angewendet wurde, vgl. Abb. 5, führt entgegen der auf die Erfahrungen

des Motorbetriebes gegründeten Vermutung zu einer Abnahme des Schwingungsausschlages. Dafür fehlt noch eine Erklärung.

Wenn somit, wie das vorerwähnte Beispiel zeigt, die Erscheinungen klopfender Verbrennung im Motor und in der Bombe im gewissen Widersprüchen zu stehen scheinen, so verdient die hier eingeschlagene Forschungsrichtung deshalb Beachtung, weil die durch sie aufgezeigten Schwierigkeiten erst recht Anlaß zu einer eingehenden Durchforschung geben können. Im übrigen sei erwähnt, daß auch bei den im größten Umfang von der General Motors Corporation in den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführten, umfangreichen Untersuchungen [8] die beim Klopfen auftretenden Schwingungen besonders beobachtet wurden. Ihre Frequenz wird mit 3 000 bis 6 000 Hz angegeben, während sich aus den von Koehling veröffentlichten Oszillogrammen bei den wesentlich niedrigeren Anfangsdrücken Werte von etwa 800 bis 1 000 Hz ablesen lassen. Diese Befunde stehen immerhin in gewissem Einklang miteinander. Es möge noch hervorgehoben werden, daß, abgesehen von ganz wenigen Forschern, Einstimmigkeit darüber besteht, daß es sich bei der klopfenden Verbrennung im Motor nicht um eine Detonation in dem in der physikalischen Chemie üblichen Sinne, sondern um eine Erscheinung besonderer Art handelt, die von der Detonation grundsätzlich unterschieden werden muß.

b. Analytische und spektroskopische Untersuchung des Klopfens

Schon Ricardo hat den überragenden Einfluß des Kraftstoffes auf das Klopfen erkannt, demgegenüber die sonstigen Betriebsbedingungen sowie die Gestaltung des Verbrennungsraumes von mittelbarer Bedeutung sind. Es lag daher nahe, die Vorgänge im Motor nicht nur durch Aufzeichnen des Druckverlaufs, sondern auch mit den Mitteln des Chemikers zu erfassen. Hierzu dienen vor allem die Analyse und die Spektroskopie. Bei der Schnelligkeit, mit der die Verbrennung abläuft, stan-

dem diesem Vorhaben nicht unerhebliche Schwierigkeiten im Wege. Trotzdem wurden Mittel und Wege gefunden, durch gesteuerte Ventile dem Verbrennungsraum zu verschiedenen Zeitpunkten des Verbrennungsablaufes Gasproben zu entnehmen, die nicht nur eine qualitative, sondern zum Teil auch eine quantitative Analyse ermöglichten [9]. Da es bei den unter [4] erwähnten Arbeiten gelang, den Verbrennungsraum im Zylinder sichtbar zu machen, lag es nahe, die Strahlung auch spektroskopisch zu untersuchen, um dadurch näheren Aufschluß über die Vorgänge zu erhalten [10]. Unter den Forschern herrscht weitgehende Übereinstimmung darüber, daß die bei der Oxydation von Kohlenwasserstoffen beobachteten Lumineszenzen und kalten Flammen mit Vorreaktionen zusammenhängen. Die Abhängigkeit der Temperaturen, bei denen diese Erscheinungen beginnen und enden, von dem chemischen Aufbau eindeutig bestimmter Kraftstoffe zeigt eine weitgehende Parallele mit dem bezüglich der Klopffestigkeit bekannten Verhalten dieser Stoffe. Es konnte bei klopfenden Motoren sowohl analytisch als auch spektroskopisch in der Periode vor der Explosion die Bildung von Aldehyden, insbesondere von Formaldehyd festgestellt werden. Dies ist allerdings nicht so zu deuten, daß die Anwesenheit von Formaldehyd als Ursache für das Klopfen anzusehen ist, denn man konnte durch Zugabe von Formaldehyd das Klopfen nicht künstlich erzeugen. Vielmehr ist es als eine Verbindung anzusehen, die bei den als ursächlich betrachteten Vorreaktionen gebildet wird. Über den vermutlichen Reaktionsverlauf bestehen verschiedene Hypothesen. Es bleibt Ziel der Forschung, hierin Klarheit zu schaffen und eine Theorie aufzustellen, die alle Beobachtungen befriedigend erklärt.

Bei den analytischen Untersuchungen wurden weiterhin auch Peroxyde und peroxydische Radikale nachgewiesen, die man schon früher in den Auspuffgasen klopfender Motoren festgestellt hatte [11]. Man nahm ursprünglich an, das Peroxyde in größerer Menge gebildet werden und ihr plötzlicher Zerfall die Ursache des Klopfens sei. Dies konnte auf Grund reaktionskinetischer Betrachtungen als unwahrscheinlich erkannt

werden. Damit ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß die Anwesenheit von Peroxyden das Klopfen fördert, wie von A. Egerton und A. R. Ubbelohde gezeigt werden konnte [12]. Nach dem heutigen Stand der Untersuchungen kann entsprechend der sogenannten Peroxyd-Theorie des Klopfens als sicher angenommen werden, daß die als Zwischenprodukte auch der normalen Verbrennung bekannten Peroxyde für das Klopfen wesentlich sind, indem sie den als Kettenreaktion anzusehenden Vorgang fördern. Die Wirkung der später noch genau zu besprechenden Gegenklopfmittel besteht zweifellos darin, diese Wirkung der Peroxyde aufzuheben und dadurch die Kettenreaktionen abzubrechen [13]. Die weitergehenden Behauptungen der Peroxydtheorie sollen als noch nicht völlig erwiesen hier außer Betracht bleiben.

In letzter Zeit haben G. Damköhler und W. Eggersglüß analytische Untersuchungen im Zusammenhang mit Untersuchungen von E. Schmidt und E. Mühlner unternommen, über die sie ausführlich berichten [14]. Da diese Arbeiten jedoch noch kein abschließendes Urteil gestatten, wird auf eine eingehende Wiedergabe verzichtet; die verwendete Apparatur ist aber mit Rücksicht auf die versuchstechnischen Schwierigkeiten beachtlich und vielleicht noch weiter entwicklungsfähig.

c. Auswirkung des Klopfens auf die Temperatur der Zylinderwände und des Kolbens, den Wärmeübergang und die Motorleistung

Die Entstehung der in Abschnitt a näher beschriebenen Druckschwingungen, die sowohl im klopfenden Motor, als auch unter gewissen Bedingungen bei Versuchen in der Bombe beobachtet werden, erscheint noch nicht völlig geklärt. Fest steht jedoch, daß sie nicht als Ursache für das Klopfen, sondern eher als eine Folgeerscheinung anzusehen sind. Es liegt jedenfalls der Schluß nahe, daß bei der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Druckschwingungen und ihrer hohen

Frequenz im Verbrennungsraum auch örtlich erhebliche Druckunterschiede zwischen den einzelnen Raumpunkten auftreten, so daß das Indikatordiagramm je nach Trägheit des Gerätes meist nur zeitliche und räumliche Mittelwerte zeigt.

Fraglich erscheint hingegen, ob die Zustandsänderungen, die z.B. in dem noch nicht verbrannten Gemischrest durch die auftretende Klopfwelle hervorgerufen werden, adiabatisch verlaufen und dementsprechend berechnet werden können. Ist doch schon von der Theorie der Bunsenflamme her bekannt, daß in der Brennfläche die Geschwindigkeit sprunghaft ansteigt und daher auf Grund der Energiebilanz dort örtliche Druckunterschiede auftreten müssen. Die Geschwindigkeiten und die mit ihnen zusammenhängenden Druckänderungen sind jedoch bei der normalen Verbrennung so klein, daß diese unbedenklich als adiabatisch angesehen werden können. Wenn diese Annahme jedoch nicht zutrifft, weil die Zustandsänderung nicht umkehrbar verläuft und nicht als unendlich langsam angesehen werden kann, wie es bei echten Detonationen bestimmt der Fall ist, muß die von Hugoniot abgeleitete Gleichung für die - mitunter auch als dynamische Adiabate bezeichnete - Zustandsänderung angewendet werden [6, S. 163]. Nach dieser ergeben sich wesentlich höhere Temperaturen als bei umkehrbaren Vorgängen.

Wenn es sich auch bei der klopfenden Verbrennung, wie bereits am Ende des Abschnittes a erwähnt, um keine Detonation im üblichen Sinne handelt, so treten nach den vorliegenden Beobachtungen immerhin so hohe Geschwindigkeiten auf, daß sie eine Erhöhung der Temperaturen gegenüber den adiabatisch errechneten Werten wahrscheinlich machen. Aus dem oben bereits gezogenen Schluß auf örtliche Drucksteigerungen folgt somit auch die berechtigte Annahme, daß örtlich erhebliche Temperaturerhöhungen auftreten. Sie mit Temperaturmeßgeräten nachzuweisen, erscheint wegen deren Trägheit undurchführbar. Hingegen konnten Rassweiler und Withrow diese Annahme durch optische Temperaturmessungen bestätigen [15]. Es ist allerdings zu beachten, daß bei der Auswertung solcher opti-

scher Messungen gewisse Vorsicht am Platze ist, weil der Anregungszustand der Moleküle und Radikale nicht eindeutig festliegt. Immerhin ergibt sich damit eine einfache und zwanglose Erklärung für die bei jedem klopfenden Motor zu beobachtende Erhöhung der Zylinderwand- und Kolbentemperatur. Dies kann allerdings aus begreiflichen Gründen beim Übergang vom nicht klopfendem zum klopfenden Betrieb erst nach einiger Zeit beobachtet werden. Eine Folge der erhöhten Verbrennungsraum-Temperaturen ist ein wesentlich höherer Wärmeübergang, der letzten Endes mehr Wärme an das Kühlwasser abführt und dadurch eine Leistungseinbuße zur Folge hat. Der Kolben kann dabei wegen der aus konstruktiven Gründen wesentlich schlechteren Kühlungsmöglichkeit beim Klopfen thermisch überbeansprucht und leicht beschädigt werden.

Mittelbar bewirkt der Zwang, bei klopfendem Kraftstoff mit niedrigerem, gewöhnlich durch Drosseln eingestelltem Verdichtungsenddruck zu fahren, eine weitere Leistungseinbuße, denn es ergibt sich dadurch bei Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste ein niedrigerer Wirkungsgrad. Dies ist neben der unerwünschten Überbeanspruchung des Triebwerks durch das Klopfen einer der Hauptgründe, weshalb im Fahrzeug- und vor allem im Flugzeugbetrieb die Verwendung möglichst klopffester Kraftstoffe angestrebt wird; denn jede diesbezügliche Ersparnis wirkt sich in einer Vergrößerung des Zuladegewichtes oder bei gleichbleibender Kraftstoffmenge in einer Vergrößerung des Fahr- oder Flugbereichs aus.

4. Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen

Nach den vorausgegangenen Erörterungen kann der Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen auf die Neigung zu klopfendem Betrieb leicht beurteilt werden. Gefördert wird das Klopfen nicht nur durch ein hohes Verdichtungsverhältnis, sondern auch durch Überladung, durch Erhöhen der Temperatur von

Ansaugeluft oder Kühlwasser sowie durch Absinken der Drehzahl.

Der Grund für eine Förderung des Klopfens durch Erhöhen des Druckes der angesaugten Luft (Überladung) ist klar, denn diese ergibt einen entsprechend erhöhten Verdichtungsenddruck; dieser aber ist eine entscheidende Größe für die Gefahr des Klopfens. Auf gleicher Höhe liegt wegen der Steigerung der Verdichtungsendtemperatur der Einfluß einer Vorwärmung der Luft, die aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zur Ausnützung der Abgaswärme oder, beim Höhenflug unter dem Zwange betrieblicher Notwendigkeiten angewendet wird. Befindet man sich an der Klopfgrenze, so läßt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der anwendbaren Überladung und der Luftvorwärmung erkennen. Wie später noch auszuführen sein wird, kann er dazu dienen, Kraftstoffe besser zu beurteilen, als dies durch die Oktanzahl, die nur einen einzigen Betriebszustand erfassen kann, möglich ist. Ein Beispiel für diesen Zusammenhang zeigt Abb. 6 nach F. A. F. Schmidt, die das Ergebnis von Versuchen an einem wassergekühlten Motor mit einem Verdichtungsverhältnis von 1 : 7 und einer Drehzahl von 2000 U/min wiedergibt. Daraus ist auch zu ersehen, welchen Einfluß die Luftüberschußzahl λ hat, die neben den aufgezählten Betriebsbedingungen noch als weitere, willkürlich wählbare Betriebsbedingung anzusehen wäre. Es ist jedoch zu beachten, daß man im praktischen Betrieb von einem Wert λ = 0,85 bis 0,90 nicht abzugehen trachtet, denn bei niedrigeren Werten steigt wegen der dann eintretenden unvollkommenen Verbrennung der Kraftstoff-Verbrauch stark an, bei höheren wird hingegen wegen des Rückganges der in den Zylinder gebrachten Kraftstoffmenge die Leistung vermindert. Abb. 7, ebenfalls nach F. A. F. Schmidt, zeigt, daß der Zusammenhang zwischen diesen Größen sich bei Motoren sehr unterschiedlicher Bauart nur wenig ändert. Die einzelnen Werte für den mittleren Nutzdruck p_e und den Kraftstoffverbrauch b_e sind des besseren Vergleichs halber so umgerechnet, daß sich bei λ = 1,0 für beide Werte 100 % ergeben. Eine Steigerung der Luftüberschußzahl zur Verhinderung

des Klopfens ist daher nur als eine Notmaßnahme zu bewerten und als solche jedem Kraftfahrer geläufig. Es kann hier auch an die im Abschnitt a näher beschriebenen Versuche von A. Köchling erinnert werden, in denen der Einfluß der Luftüberschußzahl bei Bombenversuchen eingehend geprüft wurde.

Die Erniedrigung der Drehzahl fördert deshalb das Klopfen des Ottomotors, weil für den Ablauf der Verbrennung mehr Zeit zur Verfügung steht. Wohl ist die Durchwirbelung der Ladung bei niedrigerer Drehzahl geringer und die Verbrennung dadurch verlangsamt, jedoch nicht in solchem Maße, daß die Gefahr des Klopfens ungeändert bliebe. Das Verhältnis der Dauer des Verbrennungsablaufes zu der eines Kolbenspieles wird dadurch ungünstiger, so daß unter sonst gleichbleibenden Bedingungen bei Absinken der Drehzahl Klopfen eintreten kann. Sinngemäß wird bei Erhöhung der Drehzahl trotz der besseren Durchwirbelung der Verbrennungsablauf nicht im gleichen Maße gefördert, so daß er bezogen auf den Kurbelwinkel mehr Zeit in Anspruch nimmt und dadurch die Gefahr des Klopfens vermindert wird.

3. Einzelheiten des Betriebes mit zündträgen Kraftstoffen beim Dieselmotor

Wie schon in der Einleitung zum Hauptabschnitt I hervorgehoben wurde, ist zwischen dem Klopfen des Ottomotors und der beim Dieselmotor mitunter ebenso benannten Erscheinung grundsätzlich zu unterscheiden. Die Betriebsbedingungen beeinflussen den Gang des Dieselmotors, verglichen mit dem Ottomotor, in genau entgegengesetzter Weise. Es handelt sich beim Dieselmotor praktisch ausschließlich darum, den eingespritzten Brennstoff schnell genug zu zünden, um ein dem angestrebten Gleichdruckverfahren möglichst angenähertes Diagramm zu erhalten.

a. Wirkung des Zündverzuges auf den Gang des Motors

Unter Zündverzug versteht man den Zeitraum, der vom Beginn der Kraftstoffeinspritzung bis zum Beginn der Zündung verstreicht. Er muß von der bei der Selbstzündung von Gasgemischen zu beobachtenden Induktionsperiode unterschieden werden, weil beim Einspritzen flüssigen Kraftstoffes dieser zuerst verdampft werden muß, damit die Reaktion überhaupt eingeleitet werden kann. Die hierzu erforderliche Zeit ist jedoch von verschiedenen physikalischen Größen abhängig und kann auch bei gleicher Induktionszeit erhebliche Unterschiede aufweisen. Die physikalischen Größen sind vor allem die Geschwindigkeit, mit der der Brennstoffstrahl durch die Düsen in die verdichtete Luft eintritt, der Durchmesser der am Mantel des Strahlkegels zerstäubten Kraftstofftröpfchen und die Verwirbelung des verdichteten Luftinhaltes des Verbrennungsraumes.

Der Zündverzug setzt sich somit aus mindestens zwei noch näher zu besprechenden Abschnitten zusammen, von denen der erste mehr physikalischer und der zweite mehr chemischer Natur ist. Wesentlichen Einfluß auf ihn hat auch die Gestaltung des Verbrennungsraumes und die Frage, ob eine Vorkammer, ein Luftspeicher, besondere Formen des Kolbenbodens oder ähnliche Maßnahmen getroffen werden. In dieser Hinsicht weisen die Dieselmotoren eine wesentlich größere Mannigfaltigkeit der Bauformen auf als die Ottomotoren.

Es ist weiterhin noch folgendes zu beachten: Der Zündverzug kann, wie dies im allgemeinen der Fall ist, dazu führen, daß sich bei Eintritt der Zündung im Zylinder bereits eine so große Kraftstoffmenge vorfindet, daß der Druck, ganz abweichend vom praktisch nie zu erreichenden Verlauf des Gleichdruckverfahrens, sehr schnell ansteigt und dadurch ähnliche mechanische Überbeanspruchungen des Triebwerkes auftreten wie beim klopfenden Ottomotor. Dies ist in Abb. 8 schematisch nach Boerlage und Broeze dargestellt [16]. Diese Erscheinung ist dann zu beobachten, wenn der Kraftstoff wegen seiner chemischen Beschaffenheit spät zündet, der Verbrennungsrauminhalt

jedoch gut durchmischt ist und die einmal eingetretene Zündung schnell durchgreift.

Der Zündverzug kann jedoch bei schlechter Gemischbildung in einen Verbrennungsverzug ausarten, bei dem es gar nicht zu dem erwähnten plötzlichen Druckanstieg kommt, vielmehr die Verbrennung schleichend vor sich geht und dadurch zu Leistungs- und Wirkungsgradverlusten führt. Dies sind unerwünschte Erscheinungen, die ebenfalls durch den Zündverzug verursacht sind, ohne daß dabei ein Klopfen der Maschine zu beobachten ist. Eine Beseitigung dieses Mangels ist dann mehr eine Frage der Bauform.

Daß aber andererseits der Zündverzug nicht ausreicht, die Eignung eines Dieselkraftstoffes zu kennzeichnen, läßt sich z.B. an Hand der Abb. 9 a, b und c zeigen. Dort sind dem Zündverzug in Abhängigkeit von der je Zylinder zugeführten Wärmemenge die Drucksteigerung $\frac{dp}{dt}$ und der höchste Druck p_{max} gegenübergestellt.

Dabei zeigt sich, daß Rückschlüsse vom Zündverzug allein auf die Betriebseigenschaften eines Kraftstoffes nicht zulässig sind. Die Drucksteigerung z.B. weist trotz nicht allzu großer Unterschiede im Zündverzug erhebliche Abweichungen auf.

Für den Zündverzug und die anschließende Verbrennung sind die der Zündung unmittelbar vorausgehenden Vorgänge wichtig, die als Aufbereitung des Brennstoffes bezeichnet werden können. Denn im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Ottomotor, bei dem Brennstoff und Luft gut durchmischt in den Zylinder kommen, sind beim Dieselmotor, wie erwähnt, besondere Maßnahmen baulicher Art nötig, um dem Indikatordiagramm den gewünschten Verlauf zu geben. Es sei deshalb wegen des engen Zusammenhanges zwischen dem Zündverzug und dem Verbrennungsablauf auf die Arbeiten von K. Zinner verwiesen, der sich zum Teil auf Grund von Versuchen im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden mit den diesbezüglichen Fragen eingehend beschäftigte [17].

Zinner weist insbesondere auf die Temperaturabhängigkeit der dem Zündverzug bildenden Teilvorgänge hin, die er in Zer-

stäubung und Mischung, Erwärmung und Verdampfung, sowie Vorreaktionen unterscheidet. Überlegungen, die sich hieran schließen, führen dazu anzunehmen, daß bei niedrigeren Lufttemperaturen die chemischen Reaktionen wegen ihrer starken Abhängigkeit von der Temperatur ausschlaggebend sind; denn dann erfordern sie wegen der zu kleinen Reaktionsgeschwindigkeit beträchtliche Zeit, der gegenüber die übrigen Vorgänge nicht so ins Gewicht fallen. Bei hohen Temperaturen sind hingegen die von ihnen in geringem Maße abhängige Zerstäubung und Mischung wohl als maßgebend anzusehen. Die Verdampfungsgeschwindigkeit nimmt eine mittlere Stellung ein, weil sie von der Temperatur zwar abhängt, doch nicht in demselben Maße wie die chemische Umsetzungsgeschwindigkeit.

Da nun nach allgemeinen Beobachtungen der Gesamtzündverzug mit steigender Lufttemperatur sehr stark abnimmt und sein Betrag weitgehende Übereinstimmung mit den für einen bestimmten Kraftstoff auf Grund seines chemischen Molekülaufbaues zu erwartenden Wert aufweist, ist der Schluß zulässig, daß bei den Verhältnissen im Dieselmotor die chemischen Reaktionen von entscheidender Bedeutung sind. Eine gewisse näher zu beschreibende Art von Beobachtungen, die mit dieser Annahme in Widerspruch zu stehen scheint, läßt sich folgendermaßen erklären:

Setzt man die bei adiabatischer Verdichtung von Kraftstoffdampf-Luft-Gemischen gemessenen Zündverzugszeiten als Induktionszeiten zur Berechnung der Aktivierungswärme der betreffenden Kraftstoffe ein, - denn eine physikalische Aufbereitung ist in diesem Falle nicht nötig, - so erhält man Ergebnisse, die sich mit denen aus anderen Beobachtungen decken [6; S. 285, 463 u. 574]. Im Falle der Einspritzung von flüssigem Kraftstoff in verdichtete heiße Luft führt diese Rechnung nur dann zu übereinstimmenden Ergebnissen, wenn die Lufttemperatur niedrig ist; bei Temperaturen von 500° C aber, wie sie am Ende der Verdichtung im Dieselmotor herrschen, ergibt die Rechnung für die Aktivierungswärme zu kleine Werte. Dies läßt sich aufklären, wenn man die Abkühlung der verdichteten Luft durch den ein-

dringenden kalten Kraftstoff berücksichtigt. Man darf die Reaktionstemperatur nicht der Lufttemperatur vor der Einspritzung gleichsetzen. Diese örtliche Temperaturerniedrigung kann im Hauptverbrennungsraum eines Dieselmotors durch Aufnahmen von Indikator-Diagrammen kaum erfaßt werden. Dagegen kann man in Diagrammen, die F. Dreihaupt /18/ vom Druckverlauf im Hauptverbrennungsraum und in den beiden Luftspeichern eines Dieselmotors Bauart Lanova veröffentlichte, die mit dem Eindringen des Kraftstoffes durch die Abkühlung hervorgerufene gleichzeitige Senkung der Verdichtungslinie leicht erkennen. Eine solche Beobachtung ist an dem erwähnten Motor deshalb gut möglich, weil der Inhalt der beiden Speicher nur einen Bruchteil des gesamten Verbrennungsraumes ausmacht und sich die örtliche Zustandsänderung daher stark auswirkt.

Neben dem Einfluß, den die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes auf den Verlauf des durch das Indikator-Diagramm wiedergegebenen Druckes im Zylinder und damit auf die "Härte" des Ganges der Maschine hat, ist sie auch noch für das Anlassen, besonders aus dem kalten Zustande, wichtig. Es kann bei ungenügend zündwilligen Kraftstoffen vorkommen, daß dann überhaupt keine Zündung eintritt. Diese Tatsache wird zur Prüfung von Dieselkraftstoffen mit Hilfe des Anlaßverfahrens benutzt. Einzelheiten werden im Abschnitt II 1 d) erörtert.

b. Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen

Gegenüber den Verhältnissen beim Klopfen des Ottomotors zeigt sich, daß die Betriebsbedingungen den Zündverzug beim Dieselmotor in umgekehrter Richtung beeinflussen. Die Erhöhung des Ansaugedruckes wirkt sich in einer Steigerung des Verdichtungsenddruckes aus, der für die Zündung förderlich ist. Dasselbe gilt für die durch Erhöhung der Ansaugelufttemperatur bewirkte höhere Verdichtungsendtemperatur. Drosselung im Ansaugestutzen kann hingegen, wenn man sich an der Grenze be-

findet, durch Erhöhung des Zündverzuges den Gang des Motors wesentlich beeinträchtigen. Für den Fahrzeug- und Flugzeugbetrieb, der möglichst hohe Drehzahlen anstrebt, ist es wichtig, daß für solche Bedingungen besonders zündwillige Kraftstoffe zur Verfügung stehen müssen, weil die absolute Dauer des Zündverzuges bei sonst gleichbleibenden Bedingungen, wie Form und Zerstäubung des Brennstoffstrahles, Ausbildung des Verbrennungsraumes usw., praktisch gleich bleibt. Bei zunehmender Drehzahl erstreckt sich daher der Zündverzug über einen immer größer werdenden Kurbelweg und kann dadurch den Gang des Motors beeinträchtigen. Bei unverändertem Einspritzzeitpunkt setzt aber die Verbrennung nicht nur bei einem später erreichten Kurbelwinkel ein, sondern benötigt auch einen längeren Kurbelweg. Dies läßt sich zwar ausgleichen, wenn man den Einspritzzeitpunkt vorverlegt. Doch ergibt sich dadurch eine wesentliche Veränderung des Diagramm-Charakters; in Abb. 10 a und b sind die Verhältnisse rein schematisch erläutert. Dort zeigt Kurve a im Bild 10 a die Kompression ohne Einspritzung, b den Druckverlauf mit Einspritzung des Kraftstoffes bei einer als normal angenommenen Drehzahl. Wird diese um 50 % erhöht und verschiebt man den Einspritzzeitpunkt nur so weit vor, daß der Brennstoffstrahl beim selben Kurbelwinkel zündet, so ergibt sich unter Annahme sonst gleichbleibender Verhältnisse - was streng genommen nicht zutrifft - bereits eine starke Verschlechterung des Indikator-Diagrammes, wie dies Kurve c in Abb. 10 b zeigt. Sie ist aus der gleichbenannten Kurve im Bild 10 a abgeleitet.

Den Grenzfall stellt die Kurve d dar. Sie gibt - ebenfalls rein zeichnerisch entwickelt - die Verhältnisse wieder, wenn man den Brennstoff so zeitig einspritzt, daß das Ende der Verbrennung beim selben Kurvenwinkel erreicht wird, wie bei dem Verlauf nach Kurve b. Es zeigt sich, daß dann das Diagramm wohl verbessert ist, doch ist der Druckanstieg nach der Zündung, der sich dem der Kompression überlagert, steiler und außerdem die Druckspitze höher. Beim praktischen Betrieb

können sich hierbei noch wesentlich ungünstigere Verhältnisse ergeben.

4. Das gegensätzliche Verhalten klopffreudiger und zündwilliger Kraftstoffe

Aus den vorhergehenden Ausführungen war bereits in groben Zügen zu erkennen, daß alle äußeren Bedingungen, die das Klopfen beim Ottomotor verhindern und für diesen von Vorteil sind, den Zündverzug vergrößern und deshalb beim Dieselmotor zu vermeiden sind. Es ergab sich dabei, daß der chemische Aufbau der verwendeten Kraftstoffe den größten Einfluß auf das Betriebsverhalten beider Arten von Motoren hat. Dies ging aus den ersten Versuchen, die Ricardo durchführte, noch nicht mit solcher Klarheit hervor, mit der man heute die Zusammenhänge überblickt. Der Grund dafür mag wohl darin zu suchen sein, daß sich ursprünglich die Mitarbeit der Chemiker auf die bis dahin üblichen Untersuchungen konventioneller Kenngrößen der Kraftstoffe beschränkte. Wurde doch anfangs die Erforschung des Klopfvorganges fast ausschließlich von Motorenbauern betrieben.

Man hat auch erst im Laufe der Zeit die durch den chemischen Aufbau der Kraftstoffe gegebenen Gesetzmäßigkeiten richtig einzuschätzen gelernt und ihre Eignung für den motorischen Betrieb in Übereinstimmung mit dem dem Chemiker geläufigen Reaktionsverhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffe erkannt. Die diesbezüglichen Ansichten fanden eine in dem Maße stärker werdende Stütze, als zahlreiche chemisch reine Stoffe in Bezug auf Klopffestigkeit und Zündwilligkeit untersucht wurden. Denn solange man in der Hauptsache aus Erdöl gewonnene Benzine und Dieselkraftstoffe prüfte, waren die Zusammenhänge mit dem chemischen Aufbau nicht ohne weiteres zu durchschauen. Solche Kraftstoffe stellen immer ein Gemisch aus zahlreichen Einzelstoffen dar, deren Molekülbau und Anteil an dem zu prüfenden Kraftstoff je nach Herkunft erheblichen Schwankungen unterlie-

gen. Geringfügige Änderungen in der Art der Behandlung und Bearbeitung - z.B. Änderungen der Reaktionstemperaturen beim Spalten - können eine tiefgreifende Wandlung des Molekülbaues zur Folge haben oder den Anteil der Olefine sehr stark beeinflussen. Damit geht aber gleichzeitig eine Änderung der Klopffestigkeit einher.

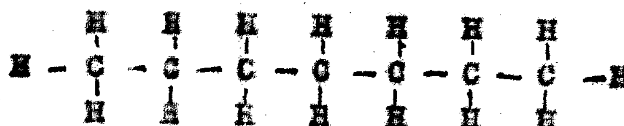
Heute ist man sich darüber völlig im klaren, welche Bedeutung es hat, ob ein als Kraftstoff verwendeter Kohlenwasserstoff kettenförmige oder ringförmige Moleküle besitzt, ob und wieviele Verzweigungen oder Doppelbindungen er aufweist und wo diese im Molekül sitzen. Es sollen deshalb nachstehend kurz die wichtigsten Gruppen von Kohlenwasserstoffen nach der in der organischen Chemie üblichen Systematik besprochen werden. Sie sind es, die fast ausschließlich für Kraftstoffe in Frage kommen. Andere organische Verbindungen, die außer Kohlenstoff und Wasserstoff noch Sauerstoff, Stickstoff oder Schwefel enthalten, spielen mit Ausnahme von zwei Alkoholen und einem Äther praktisch nur als Begleitstoffe eine mitunter nicht unwesentliche Rolle. Die Alkohole und Äther lassen sich von den Kohlenwasserstoffen leicht ableiten, wie im Abschnitt c näher gezeigt wird.

a. Die Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe

In der organischen Chemie unterscheidet man zunächst die zwei großen Gruppen der kettenförmig und der ringförmig gebauten Kohlenwasserstoffe. Zu den ersten gehören (außer den beiden Permanentgasen Methan CH_4 und Äthan C_2H_6 sowie den Flüssiggasen Propan C_3H_8 und Butan C_4H_{10}) die den Hauptbestandteil zahlreicher Erdöle bildenden Verbindungen Pentan, Hexan, Okten usw. mit der allgemeinen Bruttoformel C_nH_{2n+2}; ihr Name wird vom Pentan ab aus dem der Kohlenstoffatomzahl entsprechenden griechischen Grundzahlwort gebildet. Diese Verbindungen werden (unter Benutzung des im gewöhnlichen Sprach-

gebrauch nur für die hochmolekularen Vertreter gebräuchlichen Namens) als Paraffine bezeichnet. Man nennt sie auch Aliphaten, aliphatische oder azyklische Verbindungen, mitunter auch Alkane. Sie zeigen ein mit wachsender Atomzahl zunehmendes Ansteigen der Schmelz- und Siedetemperaturen, wie aus Abb. 11 zu sehen ist. Die höhermolekularen Stoffe dieser Reihe finden sich in den höher siedenden Fraktionen paraffinbasischer Erdöle.

Die Strukturformel dieser Stoffe hat beispielsweise folgendes Aussehen:



Wenn diese Verbindungen alle Kohlenstoffatome in einer unverzweigten Kette zeigen, nennt man sie zur Unterscheidung von sofort anschließend zu besprechenden Kohlenwasserstoffen gleicher Bruttoformel Normalparaffine; der vorstehend dargestellte Kohlenwasserstoff ist also n-Heptan (Normalheptan).

Es gibt aber auch Kohlenwasserstoffe, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch Seitenketten der allgemeinen Formel C_nH_{2n+1} (sog. Radikale, Alkyle) ersetzt sind. Sie weisen dann dieselbe Bruttoformel auf wie die Normalparaffine gleicher Kohlenstoffatomzahl, besitzen jedoch eine abweichende Anordnung der Atome. Diese Erscheinung wird als Isomerie bezeichnet, die Stoffe werden Isoparaffine genannt. Als Beispiel sei die Strukturformel des für den Motorbetrieb so wichtigen Isooktans wiedergegeben, das entsprechend der bei den Chemikern üblichen Benennungsweise auch den Namen 2,2,4-Trimethylpentan hat.[3]) Dieses ist nur eines von den 18 möglichen Isome-

3) Die dem Namen vorgesetzten Zahlen kennzeichnen das von einem Ende der Kette an numerierte Kohlenstoffatom, an dem die Verzweigung sitzt. Die Endung -yl wird zur näheren Kennzeichnung der um ein Wasserstoffatom verminderten Radikale statt der Endung "-an" an den Stamm des Namens für das entsprechende Paraffin gehängt. Radikale bezeichnet man in Formeln allgemein mit -"R", insbesondere wenn es sich um aliphatische Radikale handelt. Für die Radikale der noch zu besprechenden ringförmigen Kohlenwasserstoffe (der Aromaten) wird demgegenüber -"Ar" verwendet, wenn es auf die Unterscheidung besonders ankommt.

ren. Die Strukturformel lautet:

```
                    H                   H
                    |                   |
        H      H -  C  - H    H    H -  C  - H    H
        |           |         |         |         |
    H - C --------- C ------- C ------- C ------- C - H
        |           |         |         |         |
        H      H -  C  - H    H         H         H
                    |
                    H
```

Auch die isomeren Verbindungen zeigen, wenn man solche mit gleicher Anzahl von Verzweigungen betrachtet, einen gleichen Anstieg der Schmelz- und Siedetemperaturen wie die Normalverbindungen. Die Werte selbst liegen jedoch gegenüber denen der Normalverbindungen gleicher Kohlenstoffatomzahl niedriger. Näheres kann Bild 11 entnommen werden. Die Normal- und die Isoparaffine stellen zusammen die Gruppe der gesättigten Kohlenwasserstoffe dar, so genannt deshalb, weil jedes Kohlenstoffatom den höchstmöglichen Sättigungsgrad mit Wasserstoff aufweist [19].

Daneben gibt es eine den vorbeschriebenen Verbindungen ähnlich gebaute Gruppe von Kohlenwasserstoffen, bei denen eine oder mehrere Doppelbindungen zwischen je zwei Kohlenstoffatomen vorhanden sind. Sie werden je nach Anzahl der Doppelbindungen als <u>Olefine</u> (Monoolefine), Di-, Triolefine usw., allgemein als Polyolefine, oder als Alkene bezeichnet. Ihre Bruttoformeln lauten: C_nH_{2n}, C_nH_{2n-2} usw. Auch bei ihnen ist die Erscheinung der Isomerie, d.h. der Verzweigung und daher der Bildung von verschieden gebauten Molekeln gleicher Bruttoformel zu beobachten. Als Beispiel sei die Strukturformel der beiden möglichen Normal-Butene angegeben:[4])

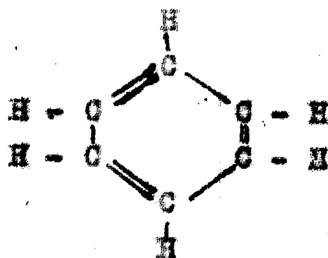
<u>n-Buten-1</u> und <u>n-Buten-2</u>

```
     H   H   H   H                     H   H   H   H
     |   |   |   |                     |   |   |   |
 H - C = C - C - C - H     und     H - C - C = C - C - H
             |   |                     |           |
             H   H                     H           H
```

---

4) Die Namen der Olefine werden durch Anhängen der Silbe -en von denen der entsprechenden Paraffine abgeleitet; die nachgesetzten Zahlen kennzeichnen das Kohlenstoffatom, an dem die Doppelbindung in der Richtung fortlaufender Numerierung ansetzt. Grundlegende Ausführungen über die Theorie der ungesättigten Verbindungen auf Grund der neuesten Ansichten siehe [20].

Während die Reihen der kettenförmigen Kohlenwasserstoffe mit Gliedern beginnen, die bei den gesättigten Verbindungen ein Kohlenstoffatom, bei den einfach ungesättigten Verbindungen zwei Kohlenstoffatome besitzen, ist von den nunmehr zu betrachtenden ringförmigen Kohlenwasserstoffen das Benzol C_6H_6 die einfachste Verbindung. Seine ausgezeichnete Stellung in der Systematik der organischen Chemie bedarf einer kurzen Erläuterung. Obwohl es seiner Bruttoformel nach sehr arm an Wasserstoff erscheint, besitzt es nur in geringem Maße die Eigenschaften einer ungesättigten Verbindung. Die Ursache hierfür ist darin zu suchen, daß die Kohlenstoffatome im Benzol eine Bindung besonderer Art aufweisen. Als sicher ist dabei anzusehen, daß sie einen symmetrischen Sechserring bilden; von jedem Kohlenstoffatom ist außer den Bindungen zu den beiden Nachbarn noch eine dritte nach dem Innern des Ringes gerichtet, so daß zur Bindung von Wasserstoff oder einem Substituenten an jedem Kohlenstoffatom nur eine Bindung frei ist. Die Strukturformel wird gewöhnlich nach Kekulé

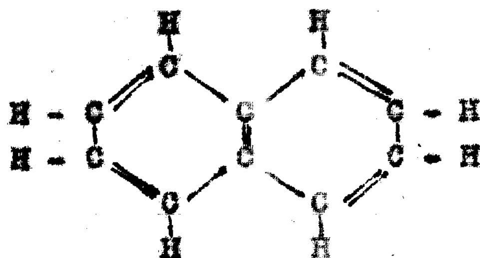


geschrieben, doch ist die darin dargestellte Doppelbindung der bei Olefinen vorkommenden keineswegs gleichwertig;[5]) der zweite Valenzstrich wird bei abgekürzter Darstellung, wenn Zweifel nicht entstehen können, weggelassen.

Das Benzol kann als Ausgangsstoff der sämtlichen aromatischen Verbindungen (Aromaten) betrachtet werden, sei es, daß mehrere Ringe in der Art, wie dies beim Naphthalin $C_{10}H_8$ mit der Strukturformel

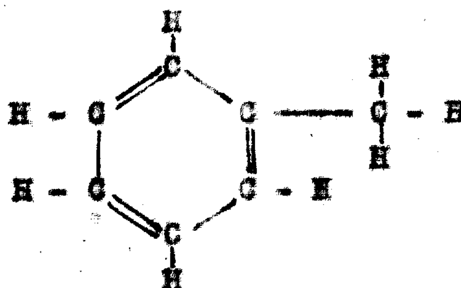
---

[5]) Vgl. hierzu die Arbeiten von Hückel [20] und Müller [19].



der Fall ist, aneinander geschlossen sind, sei es, daß statt eines Wasserstoffatoms an das Benzol oder an eine Mehrringverbindung weitere aliphatische oder aromatische Radikale angegliedert sind. Die Bedeutung der Buchstaben und für die Stellung von Radikalen oder den noch zu erwähnenden funktionellen Gruppen wird an einem Beispiel gezeigt werden.

Ein Benzolabkömmling ist z.B. das von Ricardo bei seinen Klopfwertbestimmungen benutzte Toluol, das Methylbenzol mit der Strukturformel



die gewöhnlich abgekürzt durch $C_6H_5 \cdot CH_3$ wiedergegeben wird.

Wie sich auf Grund von theoretischen Erwägungen und praktischen Erfahrungen beweisen läßt, stellt der Benzolring gegenüber Ringsystemen mit einer größeren oder kleineren Anzahl von Kohlenstoffatomen die stabilste Verbindung dar. Die sechs Kohlenstoffatome liegen nahezu in einer Ebene. Es gibt in der organischen Chemie auch eine Anzahl von Fünferringverbindungen; sie sind noch einigermaßen stabil, sind jedoch bereits leichter zu stören, als das Benzol, ähnlich wie ein mit inneren Spannungen behafteter Körper leichter zerstört oder verformt werden kann. Ringe mit vier oder drei Gliedern können, wie die Erfahrung zeigt, nur unter äußerst günstigen Umständen bestehen, während bei mehr als sechs Gliedern eine

gewisse Beweglichkeit der einzelnen Kettenglieder gegeneinander gegeben ist. Sie nimmt mit der Zahl der Kohlenstoffatome sehr stark zu und führt leicht zum Zerreißen der geschlossenen Kette.[6])

Die ausgezeichnete Stellung des Benzols kommt schließlich noch dadurch augenfällig zum Ausdruck, daß der Graphit die gleiche Atomgruppierung wie das Benzol erkennen läßt; er kann als Endglied einer restlosen Dehydrierung pflanzlicher, also organischer und letzten Endes von Kohlenwasserstoffen ableitbarer Verbindungen angesehen werden. Die von den Verbindungslinien der Kohlenstoffatome eingeschlossenen Winkel sind fast die gleichen wie beim Benzol, ebenso die Abstände zwischen den Atomen. Sein Kristallaufbau ist in Abb. 12 neben dem des Diamanten wiedergegeben und zeigt deutlich die Sechsecken-Anordnung der Kohlenstoffatome in den Schichtenebenen. Auch hier ist die Bindung innerhalb der Ringe besonders eng; daß

---

6) Der abgeschlossene Bau des symmetrischen Benzolmoleküls weist eine gewisse Parallele mit den Edelgasen auf. Diese verdanken ihre chemische Stabilität der Tatsache, daß bei ihren Atomen eine Elektronenachterschale gerade abgeschlossen ist und keine Valenzelektronen vorhanden sind. Die ihnen im periodischen System vorausgehenden Halogene, bei denen noch ein Elektron fehlt, und die ihnen folgenden Alkali-Metalle mit einem überschüssigen Elektron sind dagegen als sehr reaktionsfähig bekannt.

Beim Molekül des Benzols stehen in der Außenschale jedes Kohlenstoffatoms je vier Elektronen, in den einzigen Schalen der sechs Wasserstoffatome je sechs, zusammen also 30 Elektronen zur Verfügung. Von diesen werden für die C-H-Bindungen 2 x 6 und für die C-C-Bindungen nochmals 2 x 6 Elektronen, zusammen also 24 Elektronen benötigt. Wie die Quantentheorie zeigt, ist eine Lokalisierung der sechs verbleibenden Elektronenverbindungen des Ringes im Sinne der Formel von Kekule oder einer der anderen vorgeschlagenen Formeln gar nicht möglich. Diese Elektronen sind nicht einzelnen Atomen, sondern dem gesamten System zuzuordnen, das sich in diesem Fall in einem durch die Zahl "Sechs" ausgezeichneten, energieärmsten Zustand befindet.

Die Stabilität der Ringverbindungen findet auch in der Deformation der Valenzwinkel ihren Ausdruck. Diese beträgt bei einer Kohlenstoffatomzahl von

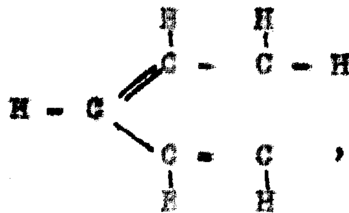
3	4	5	6
49°28'	19°28'	10°28'	0°

. Bei mehr als sechs Kohlenstoffatomen ist die Anordnung im Ring bei steigender Beweglichkeit der Glieder gegeneinander immer möglich.

die eine an jedem Atom verbleibende Bindung schwächer ist, kann man schon aus dem größeren Atomabstand zwischen den Schichtebenen erkennen, der die bekannte Blättchenform des Graphits erklärt. Beim Diamant sind hingegen alle Atomabstände gleich. Jedes Kohlenstoffatom erscheint im Mittelpunkt eines regelmäßigen Tetraeders. Dies läßt den Zusammenhang mit den aliphatischen Verbindungen erkennen, bei denen nach der Theorie von van t'Hoff und Baeyer die vier Bindungen des Kohlenstoffatoms nach den Eckpunkten eines Tetraeders gerichtet sind. Die räumliche Lage der Kohlenstoffatome eines Paraffinkohlenwasserstoffes ist in Abb. 13 wiedergegeben. Die Wasserstoffatome muß man sich entsprechend der Anordnung in einem Tetraeder aus der Zeichenebene herausgedreht denken.

Außer den vom Benzol abgeleiteten Ringkohlenwasserstoffen gibt es auch solche, bei denen jedes Kohlenstoffatom zwei Wasserstoffatome trägt, die also im Sinne der bei den kettenförmigen Kohlenwasserstoffen angewendeten Ausdrucksweise als gesättigt zu betrachten wären. Zwar haben sie in der organischen Chemie nur eine untergeordnete Bedeutung, kommen jedoch in manchen Erdölen, so z.B. in denen des Bakugebietes und in zahlreichen westukrainischen Quellen vor. Sie werden Naphthene, Zykloparaffine oder Hydroaromaten genannt. Ihre allgemeine Bruttoformel ist C_nH_{2n}. Sie sind also den Monoolefinen isomer, ihr Verhalten weicht aber von deren Verhalten sehr stark ab; vielmehr ähneln ihre Eigenschaften denen der gesättigten Kohlenwasserstoffe der Paraffinreihe.

Schließlich gibt es noch solche Zykloverbindungen, welche echte Koppelbindungen im Ring enthalten und dementsprechend als Zykloolefine, Zyklodiolefine usw. bezeichnet werden. Bei ihnen ist die Zahl sechs für die Anzahl der Kohlenstoffatome im Ring nicht mehr so ausgeprägt. Hierher gehört z.B. das Zyklopentadiën C_5H_6 mit der Strukturformel



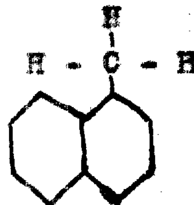
das sich besonders beim Kracken von Benzin bildet und von manchen Forschern wegen seines stark ungesättigten Charakters für die Neigung zur Harzbildung verantwortlich gemacht wird.

b. Das Reaktionsverhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen und ihr Vorkommen in den Kraftstoffen

Für die Verwendung eines Kraftstoffes ist in erster Linie von Wichtigkeit, wie er sich gegenüber dem Angriff von Sauerstoff bei hohen Temperaturen verhält. Wenn auch die Kenntnis der Reaktionsfähigkeit ganz allgemein, also auch unter anderen Bedingungen, wegen der Zusammenhänge mit der hier zu betrachtenden für die Forschung von Interesse ist, so soll sich die folgende Darstellung doch ausschließlich auf die Oxydation bei hohen Temperaturen beschränken. Jede Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit der stöchiometrisch erforderlichen Menge von Sauerstoff, d.h. also, jede vollständige Oxydation führt immer zu den beiden Endprodukten Kohlendioxyd CO_2 und Wasser H_2O. Über die Zwischenstufen, die dabei durchlaufen werden, besteht in der Forschung noch keine endgültigen Klarheit. Sicher ist, daß im Flammenspektrum von Kohlenwasserstoffen die Banden der Radikale CC, CH und OH nachgewiesen werden können. Die Kenntnis der Intensität dieser Strahlungen ist wichtig, um bei der Untersuchung abnormaler Verbrennungsvorgänge, wie z.B. beim Klopfen, die kennzeichnenden Unterschiede herausfinden zu können. Eine scharfe Unterscheidung zwischen dem Verhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen, wie sie aus der Erfahrung des motorischen Betriebes bekannt ist, war bisher bei

normaler Verbrennung durch spektroskopische und analytische Untersuchung noch nicht möglich. Man muß sich daher auf die Beschreibung der Erscheinungen ~~gen~~ als solche beschränken und versuchen, ihre Besonderheiten zunächst durch allgemeine Überlegungen verständlich zu machen.

Die kettenförmigen Normalparaffine, deren Moleküle ein Kohlenstoffgerüst aufweisen, wie es in Abb. 13 für das n-Heptan dargestellt ist, unterliegen offenbar sehr leicht dem Angriff des Sauerstoffes bei hoher Temperatur. Eine Folge davon ist der nachgewiesene geringe Zündverzug bei Dieselölen, die aus paraffinbasischen Erdölen hergestellt werden. Damit erklärt sich auch die hervorragende Zündwilligkeit der durch Synthese nach Fischer-Tropsch gewonnenen Kogasine. Diese bestehen fast nur aus Normalparaffinen, deren Kohlenstoffatomzahl je nach dem Siedebereich in der Größenordnung von 15 bis 20 liegt. Das heute als Standardkraftstoff verwendete Zetan (Hexadekan) hat die Formel $C_{16}H_{34}$. Ihm wird als Kennzeichen der Zündwilligkeit die Zetanzahl 100 zugewiesen. Um nun Eichkraftstoffe mit abnehmender Zündwilligkeit zu erhalten, wird es mit α-Methylnaphthalin gemischt, dem die Zündwilligkeit null beigelegt wird. Die Zündwilligkeit irgend eines Kraftstoffes wird dann mit der Zetanzahl x bezeichnet, wenn seine Zündeigenschaften denen eines Gemisches aus x Volum-% Zetan und (100 - x) Volum-% α-Methylnaphthalin gleich sind. Das α-Methannaphthalin ist eine Zweiringverbindung, deren Strukturformel wie folgt aussieht:



Die Bruttoformel lautet $C_{10}H_7 \cdot CH_3$. Wie sein Name sagt, ist das Radikal Methyl-CH_3 in α-Stellung angelagert. Dies muß beachtet werden, weil die Stellung von Einfluß auf die Konstitution des betreffenden Stoffes ist.

Aus der Gruppe der sehr zündträgen Naphthalinverbindungen,

von denen die meisten bei Zimmertemperatur fest sind, eignet sich das α-Methylnaphthalin deshalb als Standardkraftstoff, weil es einen tiefen Schmelzpunkt (-22° C) hat und sein Siedepunkt von 241° C im Siedebereich üblicher Dieselkraftstoffe liegt. Demgegenüber wäre das β-Methylnaphthalin, das sicher ebenso zündträge ist, mit seinem Schmelzpunkt von +34,1° C bei fast gleichem Siedepunkt als Vergleichskraftstoff völlig ungeeignet.

Die Kogasine weisen Zetanzahlen bis zu 100 und darüber auf; in reinem Zustand ist ihre Zündwilligkeit so gut, daß sie für Motoren der heute üblichen Bauarten nicht voll zur Geltung kommt. Die Kogasine werden deshalb mit Vorteil dazu verwendet, in Mischung mit zündträgen Kraftstoffen gute Dieselöle zu liefern. So berichtet z.B. H. Kölbel von Versuchen, die, über eine lange Zeit ausgedehnt, zu dem Zwecke angestellt wurden, aus Steinkohlenteerölen, deren Zündträgheit bekannt und anschließend noch näher erörtert wird, Misch-Dieselkraftstoffe herzustellen. Diese müssen nicht nur zündwillig sein, sodern dürfen bezüglich Lagerfähigkeit, Korrosionsneigung, Mischbarkeit und Verkokungsneigung handelsüblichen Dieselkraftstoffen nicht nachstehen [21]. In Abb. 14 sind die Ergebnisse von Versuchen an einem Vierzylindermotor mit einer Leistung von 30/35 PS bei 1450 U/min wiedergegeben. Der erwähnte Misch-Dieselkraftstoff bestand aus 55 Teilen Steinkohlenteeröl und 45 Teilen Kogasin. Seine Eigenschaften sowie die des zum Vergleich herangezogenen Markenkraftstoffes ausländischer Herkunft können Zahlentafel 1 entnommen werden. Die gute Eignung eines solchen Misch-Dieselkraftstoffes ist deutlich zu erkennen. Bei der Mischung von Kraftstoffen zeigt sich, daß für die Zündwilligkeit ganz allgemein, nicht nur gemäß Definition für die beiden Standardkraftstoffe, ein additives Gesetz gilt, d.h. es ist die in Zetanzahlen ausgedrückte Zündwilligkeit:

$$Z = Z_s + (Z_g - Z_s)\,x$$

wenn Z_s die Zetanzahl des zündträgen,

Z_g die Zetanzahl des zündwilligen Kraftstoffes und

x dem als Dezimalbruch ausgedrückten Anteil eines zündwilligen Kraftstoffes mit der Zetanzahl Z_g bedeuten. Die Steinkohlenteeröle, deren Verwendung in Dieselmotoren wegen ihrer Zündträgheit erhebliche Schwierigkeiten bereitet - liegt doch ihre Zetanzahl gewöhnlich in der Nähe von 20 und darunter - bestehen fast ausschließlich aus ringförmigen Kohlenstoffen von der Art des Benzols und seiner höheren Homologen. Das bereits erwähnte α-Methyl-Naphthalin $C_{10}H_7 \cdot CH_3$ ist eine solche Verbindung und wird aus Steinkohlenteer gewonnen.

Die Steinkohlenteeröle werden so wie die übrigen Erzeugnisse der trockenen Steinkohlendestillation während des Prozesses Temperaturen bis zu 1000° C und darüber unterwerfen. Sie können deshalb als Endstufen einer weitgehenden Pyrolyse angesehen werden. Nach dem, was in Abschnitt a über die Stabilität der Kohlenwasserstoffe gesagt wurde, ist es nicht verwunderlich, daß sie sich fast ausschließlich aus Aromaten zusammensetzen, denn diese zeigen unter den Kohlenwasserstoffen die größte Widerstandskraft gegen Zersetzung und verhalten sich deshalb besonders zündträge. Sie stammen größtenteils aus dem Bitumen der Steinkohlen und enthalten außer reinem Kohlenwasserstoff auch noch sauerstoff-, stickstoff- und schwefelhaltige organische Verbindungen meist ringförmigen Charakters.

Bei der synthetischen Herstellung von Kraftstoffen, bei der hauptsächlich das Verfahren von Fischer-Tropsch angewendet wird, werden die Kraftstoffmoleküle aus den einfachsten Bausteinen Kohlenoxyd CO und Wasserstoff H_2 aufgebaut. Durch Wahl der Arbeitsbedingungen ist es möglich, Kohlenwasserstoffe gewünschter Struktur zu erhalten. Die nach den Vorschlägen von Fischer-Tropsch verwendeten Katalysatoren ergeben fast ausschließlich kettenförmige Kohlenwasserstoffe, und zwar in der Hauptsache Paraffine und einen geringeren Anteil von Olefinen. Bei dem zweiten Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Kohle, nämlich der Hochdruckhydrierung, liegen die Verhältnisse grundsätzlich anders. Die hydrierbare Kohlensubstanz hat vorwiegend aromatischen Charakter. Durch die Hydrierung wird

er nicht grundlegend geändert, vielmehr werden die Makromoleküle in Mizellen aufgespalten (in Moleküle geringerer Kohlenstoffatomzahl) und durch Wasserstoffanlagerung in Verbindungen verwandelt, die bei Normaltemperatur flüssig sind. Daraus folgt die durch die Erfahrung bestätigte Tatsache, daß die Öle aus der Hochhydrierung der Steinkohle sich bezüglich Zündwilligkeit ähnlich verhalten wie die Steinkohlenteeröle.

Hier hat nun die Steinkohlenschwelung eine Bedeutung, die neben ihren sonstigen Vorteilen nicht übersehen werden soll. Da sie mit Temperaturen von 500 bis 600° C arbeitet, wird ein größerer Anteil der Kohlenwertstoffe vor der pyrolytischen Aufspaltung in Koks- und Wasserstoff bewahrt. Es ist daher nicht nur die Gesamtausbeute an flüssigen Kraftstoffen, bezogen auf die eingesetzte Kohlenmenge, größer, sondern die dabei gewonnenen Teere enthalten größere Mengen von aliphatischen und naphthenischen Verbindungen, die an sich zündwilliger als die Aromaten sind. Eine direkte Verwendung der unbehandelten Schwelteere im Dieselmotor stößt allerdings meist auf Schwierigkeiten, weil die in ihnen enthaltenen Phenole die Zündwilligkeit beeinträchtigen und vorher entfernt werden müssen.[7])

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den aus Braunkohle gewonnenen Schwelteeren. Auch die enthalten gewisse Mengen von Aliphaten, jedoch wegen des geringeren geologischen Alters der Braunkohle erhebliche Mengen sauerstoffhaltiger Verbindungen, so daß sie vor der Verwendung im Verbrennungsmotor zweckmäßig durch Hydrierung behandelt werden.

Gerade umgekehrt wie mit der Zündwilligkeit verhält es sich mit der Klopffestigkeit. Benzine, die durch einfache De-

---

7) Zu den Phenolen gehören im weiteren Sinne das Hydroxylbenzol $C_6H_5 . OH$ (Carbolsäure, auch als Phenol im engeren Sinne bezeichnet), die drei Kresole (Methylphenole) $C_6H_4 . CH_3 . OH$, die Dioxybenzole $C_6H_4 . (OH)_2$ und die Xylenole $C_6H_3(CH_3)_2 . OH$, durchwegs Verbindungen, die vom Benzol abgeleitet sind und in dem angelagerten Hydroxylgruppen Sauerstoff enthalten. Da das Phenol nicht nur im Kraftstoff einerseits unerwünscht, sondern andererseits als Ausgangsstoff für die Herstellung von Kunststoffen sehr begehrt ist, ist seine Gewinnung von großem Interesse.

stillation gewonnen sind (sog. straight-run-benzine) sind besonders dann, wenn sie aus paraffinbasischen Erdölen gewonnen werden, sehr klopffreudig, weil die kettenförmigen Kohlenwasserstoffe dem Angriff des Sauerstoffes den geringsten Widerstand entgegensetzen. Allerdings nimmt diese Eigenschaft mit der Kettenlänge im Bereiche kleiner Kohlenstoffatomzahlen sehr stark ab und die niedrigsten Glieder der Paraffinreihe sind sehr klopffest (s. hierzu auch Abb. 17). Es ist daher verständlich, daß man als Standardkraftstoff für die Ermittlung der Klopffestigkeit das im Abschnitt a bereits erwähnte n-Heptan $CH_3 \cdot (CH_2)_5 \cdot CH_3$ mit einem Siedepunkt von 98,4° C wählte und ihm die Klopffestigkeit null, in Oktanzahlen ausgedrückt, beilegte. Das als besonders klopffest angesehene Oktan, der zweite Standardkraftstoff, ist jedoch nicht das n-Oktan, sondern eines der Isooktane, und zwar das schon früher genannte 2,2,4-Trimethylpentan. Sinngemäß wie bei der Zündwilligkeit kennzeichnet man die Klopffestigkeit eines Ottokraftstoffes durch die Oktanzahl x, wenn er sich ebenso verhält, wie ein Gemisch aus x Volum-% Iso-Oktan und (100 - x) Volum-% n-Heptan. Mit dieser Definition ist auch für die Ermittlung der Klopffestigkeit von Gemischen ein additives Gesetz festgelegt. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß es nicht allgemein gilt, wie dies bei der in Zetanzahlen ausgedrückten Zündwilligkeit der Dieselkraftstoffe der Fall ist. Auch hierin kommt zur Geltung, daß es sich dort um einen im Verhältnis einfacheren chemisch-physikalischen Vorgang handelt, beim Klopfen jedoch zahlreiche, nicht ohne weiteres zu durchschauende Einflüsse eine erhebliche Rolle spielen. Es ergeben sich bei der Mischung von Ottokraftstoffen verschiedener Klopffestigkeit Abweichungen nach oben und nach unten, d.h. der durch Mischen hergestellte Kraftstoff kann Oktanzahlen aufweisen, die über und unter dem aus den Komponenten additiv zu errechnenden Werten liegen.

Um nun bei der Mischung nicht immer auf die Untersuchung im Prüfmotor angewiesen zu sein, hat man für einfache, definierte Kraftstoffe, wie Isooktan und Benzol, aber auch für

Polymerbenzine, die sich zur Klopfwertverbesserung besonders eignen, sogenannte Misch-Oktanwerte ermittelt. Diese liegen bei Iso-Oktan und Benzol bis zu 10 bzw. 13 Einheiten unter den Oktanzahlen der reinen Zusatzstoffe von 100 bzw. 97. Die Misch-Oktanwerte müssen in die Rechnung eingesetzt werden, um richtige Oktanzahlen des gemischten Kraftstoffes zu erhalten. Sie ändern sich sowohl mit dem Anteil des zuzumischenden Klopfwertverbesserers als auch mit dem ursprünglichen Klopfwert des zu verbessernden Kraftstoffes. Bei dem noch zu erwähnenden Polymerbenzin liegen die Oktanwerte hingegen weit über der Oktanzahl des unvermischten Kraftstoffes, die etwa 81 beträgt.

Eine Erklärung hierfür läßt sich geben, wenn man berücksichtigt, daß es sich bei der Zündung von Kohlenwasserstoff-Luft-Gemisch um Kettenreaktionen handelt. Jene Kohlenwasserstoffe oder Gemische werden demnach klopffest sein, bei denen die sich bildenden Zerfallsprodukte zum Abbruch der Reaktionskette führen. Dadurch muß die Zündung immer wieder von neuem anlaufen und das plötzliche Entflammen des gesamten Verbrennungsrauminhaltes wird dadurch verhindert. Wenn man also zwei Kraftstoffe verschiedener Klopffestigkeit miteinander mischt, so wird jene Komponente, die die Bildung von Reaktionsketten und damit das Klopfen fördert, in entsprechendem Verhältnis verdünnt. Wenn sich dann die Zerfallsprodukte der letzten Komponenten nicht gegenseitig beeinflussen, oder richtiger ausgedrückt, quantitativ in gleicher Weise beeinflussen wie dies bei einer Mischung aus n-Heptan und i-Oktan der Fall ist, so gilt für die Ermittlung der Oktanzahl ein additives Gesetz; die Mischoktanwerte sind dann gleich denen der unvermischten Komponenten.

In dem Maße aber, in dem sich durch die eine zugemischte Komponente ein Einfluß auf den Reaktionsverlauf der anderen geltend macht, entstehen Abweichungen vom additiven Gesetz und der Mischoktanwert ändert sich. Man muß daher annehmen, daß die kettenabbrechende Wirkung der in Polymerbenzinen vorkommenden Olefine bei der Oxydation der Moleküle der aufzubessernden

Kraftstoffe sehr stark zur Geltung und dadurch die hohe Misch-Oktanzahl von Polymerbenzinen zustande kommt.

Diese Zusammenhänge lassen sich graphisch darstellen, wenn man das ursprünglich von Ricardo als Maß der Klopffestigkeit benutzte höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis über dem am besten in Molenbruchzahlen ausgedrückten Mischungsverhältnis der beiden Komponenten aufträgt. Nach dieser Darstellung verläuft die Linie für eine Mischung aus n-Heptan und i-Oktan als nach oben konvexe Kurve, anfangs nur wenig, mit zunehmendem Gehalt an Iso-Oktan stärker ansteigend.

Gleiche Änderungen des i-Oktangehaltes wirken sich also bei niedrigem Gehalt wesentlich schwächer aus als bei höherem. In Abb. 15 sind solche Kurven nach Lovell, Campell und Boyd wiedergegeben [22] und [6, S. 554]. Es fällt allerdings auf, daß die Kurven für Benzol einem Grenzwert zustreben, der im Widerspruch zu dem sonst bekannten, in Oktanzahlen ausgedrückten Wert für die Klopffestigkeit von Benzol steht. Mögen somit die Kurven auch quantitativ nicht stimmen, so sind sie immerhin geeignet, die Zusammenhänge klar zu machen, auf die es hier ankommt. Es müssen danach für Mischungen, für die ein additives Gesetz gilt, die Kurven so verlaufen, daß die Tangenten für Punkte gleichen Wertes von ε_{max} affin zueinander liegen. Dies ist schematisch in Abb. 16 dargestellt, worin die Kurve a den Verlauf für die Standardmischung aus n-Heptan (H) und i-Oktan (O) darstellt. Das additive Gesetz gilt dann, wenn sich die Verhältnisse für zwei andere Komponenten A und B durch Kurve b wiedergeben lassen. Wenn jedoch die tatsächlich zu erzielenden höchsten nutzbaren Verdichtungsverhältnisse durch eine Linie ähnlich der Kurve c dargestellt werden, so heißt das, daß der Misch-Oktanwert der Komponente B niedriger ist, als die in Oktanzahlen ausgedrückte Klopffestigkeit der reinen Komponente B. Dieser Wert wird erst im Grenzfall für B = 100 % erreicht. Gilt jedoch eine Kurve nach der Art der Linie d, so liegen die Verhältnisse umgekehrt. Es lassen sich geometrische Beziehungen ableiten, durch die bei gegebenem Kurvenverlauf die Mischoktan-

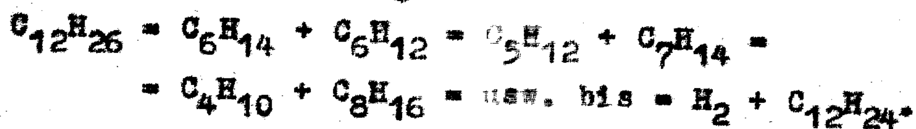
zahlen, die sich von Punkt zu Punkt ändern, mit Hilfe von Tangenten zeichnerisch ermittelt werden können. Verhältnisse, wie sie durch Kurve d dargestellt sind, bei denen also im Bereiche kleinster Zumischung der klopffesten Komponente extrem hohe Mischoktanzahlen gelten, werden im Abschnitt 5 bei den Gegenklopfmitteln noch näher zu besprechen sein.

Die für Benzol mit 97 angegebene Oktanzahl kennzeichnet dieses als sehr klopffesten Ottokraftstoff und deckt sich mit der bereits wiederholt hervorgehobenen Tatsache, daß die Aromaten als reaktionsträge anzusehen sind. Sie haben jedoch als Ottokraftstoffe trotz ihrer hervorragenden Klopffestigkeit deshalb praktisch keine erhebliche Bedeutung, weil sie in der Hauptsache nur als Nebenprodukte der Hochtemperaturverkokung der Steinkohle in beschränkter Menge gewonnen werden. Diese Mengen müssen außerdem den Bedarf für andere Zwecke (Lösungsmittel, Sprengstoffe usw.) decken.

Zur Gewinnung klopffester Kraftstoffe steht jedoch heute eine Anzahl von Verfahren zur Verfügung, durch die zwar keine Aromaten, sondern vorzugsweise Olefine und Isoparaffine gewonnen werden. Von diesen haben sich aber die meisten als sehr klopffest erwiesen. Es muß daher der Einfluß von Verzweigungen und Doppelbindungen näher betrachtet werden. Bei Ottokraftstoffen kommt dieser Einfluß deshalb stärker zur Geltung, weil hierfür die niedrig siedenden Kohlenwasserstoffe oder Gemische daraus verwendet werden. Bei solchen niedrig-molekularen Verbindungen fallen Doppelbindungen oder Verzweigungen oder beides zugleich schon bei geringer Anzahl für die Eigenschaften des Kraftstoffes erheblich ins Gewicht. Bei den Dieselkraftstoffen mit wesentlich höheren Siedebereich, die aus Kohlenwasserstoffen mit rd. 15 und mehr Kohlenstoffatomen bestehen, müßten Verzweigungen und Doppelbindungen in weit größerer Anzahl vorhanden sein, als dies bei den vorkommenden Kraftstoffen der Fall ist, um das Verhalten im Motor merkbar zu beeinflussen. Es sind also auch in dieser Hinsicht die Verhältnisse beim Dieselmotor übersichtlicher als beim Ottomotor, weil es dort für

die Zündwilligkeit im wesentlichen nur auf das Verhältnis der kettenförmigen zu den ringförmigen Anteilen ankommt.

Olefine finden sich in geringer Menge schon in den natürlich vorkommenden Erdölen. Bei der Verarbeitung werden sie in größerer Menge gebildet, und zwar durch das Kracken hochmolekularer Kohlenwasserstoffe. Veranlassung zu der Einführung des Krackverfahrens in der Erdölindustrie war dadurch gegeben, daß die durch einfache Destillation aus dem geförderten Rohöl gewonnenen Fraktionen einen sehr unterschiedlichen Marktwert hatten. Der schon vor dem ersten Weltkrieg stark ansteigende Verbrauch an Motorkraftstoffen hatte zur Folge, daß bei dem damals üblichen Verfahren große Mengen höher siedender Fraktionen mit erzeugt werden mußten, für die keine rechte Verwendung bestand. Der dadurch bedingte niedrige Preis der Gasölfraktionen war bekanntlich neben dem guten Wirkungsgrad ein wesentlicher Umstand, der das Vordringen des Dieselmotors begünstigte. In dieser Zwangslage war für die Erdölindustrie die Entdeckung des Krackverfahrens äußerst willkommen, durch das es gelang, aus höher siedenden, schlecht absetzbaren Erdöldestillaten Benzine zu gewinnen. Wählt man Druck und Temperatur des Verfahrens passend, so kann die pyrogene Zersetzung der hochmolekularen Verbindung durch das Kracken in bestimmte Bahnen gelenkt werden. Dabei kann mit oder ohne Katalysatoren gearbeitet werden. Es gibt heute eine sehr große Zahl von Verfahrensvorschriften und Patenten, die hier nicht näher besprochen werden können [23]. Allen gemeinsam ist als Arbeitstemperatur ein Bereich zwischen 400 und 500° C. Der Druck wird verschieden gewählt. Ebenso bestehen Unterschiede darin, ob das Kracken in flüssiger, dampfförmiger oder in beiden Phasen zugleich durchgeführt wird. Kennzeichnend für den Vorgang ist folgende, für das Dodekan entwickelte Gleichung:



$$C_{12}H_{26} = C_6H_{14} + C_6H_{12} = C_5H_{12} + C_7H_{14} =$$
$$= C_4H_{10} + C_8H_{16} = \text{usw. bis} = H_2 + C_{12}H_{24}.$$

Das Paraffin wird also in ein Paraffin von kleinerer Kettenlänge und in ein Olefin aufgespalten. Eine Temperatursteigerung

bewirkt eine Verschiebung der Spaltstelle an das Ende des Moleküls, hoher Druck bewirkt dagegen, daß die Spaltstücke mehr symmetrisch werden. Für das Kracken kommen wesentlich nur Ausgangsstoffe in Frage, die größtenteils aus kettenförmigen Kohlenwasserstoffen bestehen; Aromaten bleiben wegen ihrer Hitzebeständigkeit - abgesehen von etwa vorhandenen Seitenketten - im allgemeinen unverändert. Naphthene werden beim Kracken meist ihres Wasserstoffes beraubt und zu Aromaten oder zu Zwischengliedern zwischen diesen und den Naphthenen dehydriert.

Die Klopffestigkeit der durch Kracken gewonnenen Benzine ist darauf zurückzuführen, daß sich der Vorgang in erster Linie auf Kosten der klopffreudigen Anteile abspielt und das Krackbenzin für die Verbrennung im Motor gewissermaßen vorbehandelt ist. Wie die Klopffestigkeit von Normal- und Isoparaffinen gesteigert wird, wenn das Kohlenstoffgerüst Doppel- und dreifache Bindungen enthält, zeigt Abb. 17.

Die Tatsache der Klopffestigkeit der Olefine scheint im Widerspruch zu der sonst bekannten Reaktionsfähigkeit der Olefine zu stehen; es ist jedoch zu beachten, daß die Beständigkeit der Olefine erst bei verhältnismäßig hohen Temperaturen die der zugehörigen Paraffine überwiegt. In diesem Bereich ist aber ihr Verhalten für die Klopffestigkeit von Bedeutung. Diese Zusammenhänge lassen sich erkennen, wenn man als Maßstab der thermischen Beständigkeit von Kohlenwasserstoffen die freie Bildungsenergie betrachtet, die zum Aufbau der Verbindung aus den Elementen C_{fest} und H_{2gas} benötigt wird. Je kleiner diese bei einer bestimmten Temperatur ist, desto beständiger ist die betreffende Verbindung. Es läßt sich daher aus Abb. 18, das die freie Bildungsenergie einiger Kohlenwasserstoffe nach Francis wiedergibt [24], erkennen, daß die Werte für die Paraffine am steilsten verlaufen, diese also mit steigender Temperatur am unbeständigsten sind, während sich Benzol und Toluol abgesehen von dem als Kraftstoff nicht in Frage kommenden Naphthalin am günstigsten verhalten. Zwar ergibt sich danach, daß Aromaten im Bereiche niedriger Temperaturen thermodynamisch

unbeständig sind, doch ist die Zerfallsgeschwindigkeit so gering, daß sie praktisch keine Rolle spielt.

Zu gleichen Ergebnissen kommt man selbstverständlich, wenn man aus der freien Bildungsenergie die Konstante für das Bildungsgleichgewicht errechnet, wie dies G. B. Schultze getan hat [25]. Daran läßt sich ebenfalls das gegensätzliche Verhalten der Paraffine und der Aromaten und die Zwischenstellung der Olefine und Naphthene erkennen.

Auch die sonstigen Beobachtungen decken sich mit der Erfahrung, daß die Klopffestigkeit von den Aromaten über die Naphthene und Olefine zu den Paraffinen abnimmt. So können die im Abschnitt I 2 b erwähnten Luminiszenzen und kalten Flammen bei um so niedrigeren Temperaturen beobachtet werden, je geringer die Klopffestigkeit der betreffenden Verbindung ist; bei Benzol sind sie überhaupt nicht festzustellen. Eine bemerkenswerte Erklärung für die wesentlich höhere Klopffestigkeit der Olefine gegenüber den entsprechenden Paraffinen läßt sich mit Hilfe der sogenannten Doppelbindungsregel von C. Schmidt geben [26]. Nach dieser Regel, die sich elektronentheoretisch begründen läßt, ist in Molekülen mit Doppelbindungen ein Wechsel von starker und schwacher Bindung abnehmender Intensität in der C-C-Kette festzustellen. Man kann deshalb annehmen, daß Olefine wohl an ihrer schwächsten Stelle aufgespalten werden, daß aber durch die in der benachbarten C-C-Bindung vorhandene Verstärkung sehr stabile Radikale entstehen, die reaktionsträge sind und dadurch den Verlauf der Kettenreaktionen im Sinne einer Erhöhung der Klopffestigkeit beeinflussen.

Das Kracken verläuft nicht ohne begleitende Nebenreaktionen, durch die Koks und Gas entstehen. Dies erklärt sich aus der Gleichung für den Krackvorgang bei stark unsymmetrischer Spaltung. Das Krackgas besteht in der Hauptsache aus Paraffinen und Olefinen mit einem bis vier Kohlenstoffatomen. Mit diesen Gasen schlägt man nun, in dem Streben, zusätzliche Kraftstoffmengen für den Betrieb von Ottomotoren zu gewinnen, den umgekehrten Weg ein.

Durch geeignete Wahl von Temperatur und Katalysatoren gelingt es, aus Molekülen ungesättigter Kohlenwasserstoffe Moleküle höheren Molekulargewichtes aufzubauen. Es werden dabei die ungesättigten Bindungen der einzelnen Bausteine gegenseitig abgesättigt. Dieser Vorgang wird in der Erdöltechnik Polymerisation genannt.[8]

Da die Krackgase beträchtliche Mengen von ungesättigten Kohlenwasserstoffen enthalten, eignen sie sich besonders als Ausgangsstoff für Polymerisationsbenzin (Polymerbenzin). Auch hier gibt es eine sehr große Zahl von Verfahren, die sich auf gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe anwenden lassen. Gesättigte Kohlenwasserstoffe müssen erst gespalten oder dehydriert werden, um sie für die Polymerisation reif zu machen. Doch gibt es auch Verfahren, bei denen gesättigte Kohlenwasserstoffe unverändert bleiben und mit ungesättigten kondensiert werden. Dieser Vorgang ist als Alkylierung bekannt, weil in der Hauptsache Alkyle angelagert werden. Dabei gelingt es, Kohlenwasserstoffe mit Verzweigungen zu erhalten, wodurch die Klopffestigkeit der so hergestellten Benzine wesentlich erhöht wird. Eine Gesetzmäßigkeit der Zusammenhänge läßt sich nicht angeben, doch zeigt Abb. 19 die Abhängigkeit des kritischen Verdichtungsverhältnisses von der Kohlenstoffatomzahl je Molekül für eine Anzahl von verzweigten und unverzweigten Paraffinen. Das kritische Verdichtungsverhältnis und damit die Klopffestigkeit sind im allgemeinen um so größer, je größer die Zahl der Seitenketten ist.

Bei der Wahl der Arbeitsbedingungen für die Gewinnung von Polymerbenzinen ist man darauf bedacht, möglichst klopffeste Benzine, insbesondere reines Isooktan zu gewinnen. Dies ist z.B., ausgehend von den Abgasen von Stabilisieranlagen, für Krackbenzin möglich. Dort werden hauptsächlich Butan und Butene

---

8) Tatsächlich handelt es sich aber um eine Kondensation in der Ausdrucksweise der Chemiker, denn es werden neue C-C-Bindungen hergestellt. Unter Polymerisation verstehen die Chemiker hingegen Molekülzusammenlagerungen, die leicht wieder rückgängig gemacht werden können. Dies ist z.B. vielfach bei Sauerstoff als verbindendem Glied, nicht aber bei zwei Kohlenstoffatomen der Fall.

wegen ihres niedrigen Siedepunktes aus dem Krackbenzin entfernt, um einen Kraftstoff von genügend niedrigem Dampfdruck zu erhalten. Durch Polymerisation erhält man daraus eine Mischung von 2,2,4-Trimethylpenten-3, und 2,2,4-Trimethylpenten-4. Durch Hydrieren können diese in das entsprechende, gesättigte Iso-Oktan umgewandelt werden. Da es bei einem Siedepunkt von 99,5° C für den praktischen Betrieb eine etwas zu niedrige Flüchtigkeit aufweist, wird ihm zur Bereitung hochwertiger Fliegerkraftstoffe auf ähnliche Weise gewonnenes Isopentan, das ebenfalls sehr klopffest ist und einen Siedepunkt von 28° C besitzt, beigemischt. Es würde zu weit führen, auf die zahlreichen Verfahren einzugehen, nach denen heute durch Polymerisation klopffeste Kraftstoffe gewonnen werden können. Die Grundgedanken dürften aus dem Vorstehenden zu erkennen sein. Es soll nur noch darauf hingewiesen werden, daß es auch pyrolytisch arbeitende Verfahren gibt, bei denen hauptsächlich Aromaten aus olefinischen und paraffinischen Gasen gewonnen werden können [27].

Diese Aromatisierung ist nicht nur für die weiterverarbeitenden Verfahren der Erdölindustrie von Bedeutung, sondern auch im Anschluß an die Synthese nach Fischer-Tropsch, um die bei diesem Verfahren anfallenden, wegen ihres aliphatischen Charakters sehr klopffreudigen Leichtöle in solche mit besserem Eigenschaften für die Verwendung im Ottomotor zu verwandeln. Diesbezügliche Untersuchungen wurden von H. Koch durchgeführt [28]. Dabei zeigt sich, daß die Umwandlung teilweise ohne Spaltung durch Ringbildung der Ketten vor sich geht. Als Ausgangsstoff für dieses Verfahren sind besonders solche Kogasine geeignet, die einen höheren Anteil an Olefinen haben, was durch Wahl der Arbeitsbedingungen erreicht werden kann.

Es wurde schon im Zusammenhang mit der Gewinnung von Dieselkraftstoffen auf die Hydrierung, die Hochtemperaturverkokung der Steinkohle und die Schwelung der Stein- und Braunkohle hingewiesen. Dabei wurde festgestellt, daß im Gegensatz zur Synthese nach Fischer-Tropsch keines dieser Verfahren geeignet

ist, ohne weiteres hochwertige Dieselkraftstoffe zu liefern. Der Grund hierfür wurde darin erkannt, daß die so gewonnenen Erzeugnisse entweder zum größeren Teil aus Aromaten bestehen oder wegen der ungünstig wirkenden Begleitstoffe zumindest einer Aufarbeitung bedürfen. Ihr Gehalt an Aromaten oder Olefinen macht sie aber zu vorteilhaften Ausgangsstoffen für die Gewinnung von Ottokraftstoffen. Sie können nur wegen des meist hohen Siedebereichs nicht unverarbeitet verwendet werden. Die durch Destillation abtrennbaren Benzine sind meist ziemlich klopffest, ihr Anteil ist jedoch verhältnismäßig gering, beim Hochtemperaturteer der Steinkohle praktisch gleich Null. Durch Hydrieren wird nicht nur der Wasserstoffgehalt erhöht, es werden dabei auch die Moleküle durch Spaltung verkleinert, so daß man Fraktionen mit niedrigerem Siedebereich erhält und so sehr klopffeste Benzine erzeugen kann.

Da aber die bei hoher Temperatur zu verkokende Steinkohlenmenge durch den Bedarf der Eisengewinnung und anderer metallurgischer Verfahren bestimmt wird, mag noch kurz darauf hingewiesen werden, daß es nicht an Versuchen gefehlt hat, die Ausbeute an flüssigen Kraftstoffen dabei zu erhöhen. Durchläuft doch die zu verkokende Kohle auch bei der Hochtemperaturverkokung jene Temperaturbereiche, die bei der Schwelung angewendet werden. Die dabei entweichenden Gase und Dämpfe werden erst durch die Berührung mit den glühenden Kammerwänden oder die bereits glühende Koksschicht zersetzt. Man hat daher versucht, durch Innenabsaugung der Destillationsgase und Dämpfe aus der zwischen den Teernähten noch unzersetzten Kohlenschicht die Ausbeute an flüssigem Kraftstoff zu erhöhen [29]. Es gelang auf diese Weise, ein Teeröl zu gewinnen, das dem Schwelteer ähnlich ist und wesentlich mehr Nichtaromaten enthält als das Hochtemperaturteeröl. Die durch Hydrierung daraus hergestellten Enderzeugnisse ergeben in den höher siedenden Fraktionen Dieselöle, die bezüglich Zündwilligkeit üblichen Gasölen durchaus gleichwertig sind; aber auch die niedrig siedenden Fraktionen sind wegen des noch beträchtlichen Anteils an Aromaten

sehr klopffest.

Aus allem ergibt sich die immer wieder betonte Gegenläufigkeit der Eigenschaften von Kraftstoffen in Bezug auf Klopffestigkeit und Zündwilligkeit. Sie geht so weit, daß es möglich ist, das gegenseitige Verhältnis durch eine einfache Gleichung wiederzugeben, wie sie vom technischen Prüfstand der I. G. Farbenindustrie AG. ermittelt wurde [30]. Danach ist mit genügender Genauigkeit für einen bestimmten Kraftstoff

Oktanzahl = 120 - 2 mal Zetanzahl und

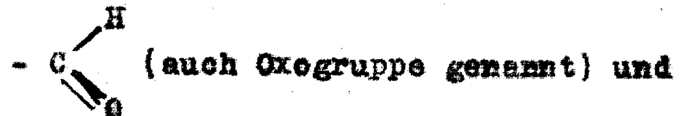
Zetanzahl = 60 - 0,5 mal Oktanzahl.

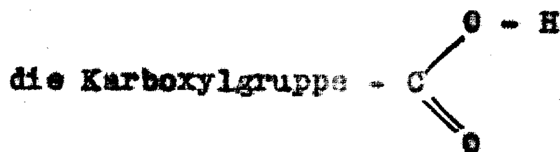
c. Die Bedeutung sauerstoffhaltiger Kohlenwasserstoffabkömmlinge

In der organischen Chemie spielen jene Gruppen von Verbindungen eine sehr große Rolle, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome der im Abschnitt a beschriebenen Hauptgruppen durch sog. funktionelle Gruppen ersetzt sind. Unter diesen sind wiederum für den Aufbau der gesamten organischen Welt jene die wichtigsten, die Sauerstoff enthalten und zwar:

die Hydroxylgruppe - OH (auch Oxygruppe genannt),

die Karbonylgruppe





Die dabei entstehenden Verbindungen sind im ersteren Falle die Alkohole, wenn sie von kettenförmigen, und die Phenole, wenn sie von ringförmigen Kohlenwasserstoffen abgeleitet werden können. Verbindungen mit einer Karbonylgruppe nennt man Aldehyde, deren einfachster Vertreter der im Abschnitt I 2 b als Zerfallsprodukt bei klopfender Verbrennung festgestellte Formaldehyd HCOH ist. Sitzt der Sauerstoff nicht an einem endständigen Kohlenstoffatom, das dann als primär bezeichnet wird,

sondern an einem in der C-C-C-Kette, so nennt man eine solche allgemein $R^{(1)} - \underset{\underset{O}{\|}}{C} - R^{(2)}$ geschriebene Verbindung einen Keton. Auch diese spielen in dem hier zu erörternden Zusammenhang eine gewisse Rolle, doch würde es zu weit führen, auf diese Einzelheiten einzugehen.

Die die Karboxylgruppen enthaltenden organischen Säuren und insbesondere die von ihnen abgeleiteten Glyzerinester, nämlich die Öle und Fette, sind für das Leben der organischen Natur, höchstwahrscheinlich auch als Ausgangsstoffe der Erdölbildung von großer Bedeutung; in Kraftstoffen sind sie aber wegen ihres sauren Charakters höchstens unerwünschte Begleitstoffe. Praktisch kommen für den Betrieb von Motoren nur die von den beiden ersten Gliedern der Paraffinreihe abgeleiteten Alkohole, nämlich der Methylalkohol C_2H_3 . OH und der Äthylalkohol C_2H_5 . OH in Frage.[9]) Die beiden genannten Alkohole sind sehr klopffest, ihre Oktanzahl beträgt nahezu 100. Bei ihrer Oxydation sind Luminiszenz und kalte Flammen erst bei höheren Temperaturen zu beobachten als bei den in Ottokraftstoffen vorkommenden Paraffinen ungefähr gleichen Siedepunktes, jedoch <u>höherer</u> Kohlenstoffatomzahl. Dies deckt sich mit ihrer in Oktanzahlen ausgedrückten Bewertung. Gegenüber den als sehr klopffest anzusehenden beiden Paraffinen <u>gleicher</u> Kohlenstoffatomzahl, nämlich Methan und Äthan, liegen jedoch ihre Werte etwas niedriger.

Beide Alkohole wurden bisher in Deutschland viel in Mischung mit Benzinen als Ottokraftstoffe verwendet. Der Äthylalkohol wurde meist durch alkoholische Gärung hergestellt; als Ausgangsstoff diente in großem Umfang die Stärke von Kartoffeln, in geringem Maße auch durch Verzuckerung von Holz nach

---

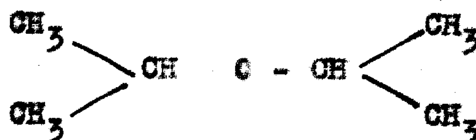
[9]) Es mag hier kurz darauf hingewiesen werden, daß Alkohole keine Dissoziation zeigen und die für sie kennzeichnende Hydroxylgruppe bei ihnen nicht dieselbe Rolle spielt, wie in wässrigen Lösungen, wo sie als Anion den basischen Charakter verursacht.

dem Verfahren von Scholler gewonnene wässrige Zuckerlösung (Würze). Weiterhin hat erhebliche Bedeutung die Gewinnung von Alkoholen aus den Ablaugen von Sulfitzellstoff-Fabriken.

Der Methylalkohol (Methanol) wurde in großen Mengen durch katalytische Synthese aus Kohlenoxyd und Wasserstoff gewonnen. Dieses Verfahren, das seit 1923 im Großbetrieb angewendet wird, kann als Vorläufer der Benzinsynthese nach Fischer-Tropsch angesehen werden. In den Vereinigten Staaten von Amerika entnimmt man die Ausgangsgase dem reichlich vorhandenen Naturgas und stellt das richtige Verhältnis von Kohlenoxyd zu Wasserstoff ähnlich wie bei Verwendung von Generatorgas durch Konvertierung mit Wasserdampf her. Diesen Verfahren gegenüber sind die sonstigen Gewinnungsverfahren, wie die aus dem bei der Holzverkohlung erhaltenen Holzessig von untergeordneter Bedeutung.

Unter Benutzung des in Fußnote 3) eingeführten Zeichens R für ein beliebiges Radikal kann man die Formel für die Alkohole allgemein mit R - O - H schreiben. Man sieht daran die strukturchemische Verwandtschaft mit dem Wasser, das als H - O - H dargestellt werden kann und mit dem die an Kohlenstoffatomen ärmsten Glieder der Alkoholreihe auch größere Ähnlichkeit aufweisen als mit den entsprechenden Gliedern der Kohlenwasserstoffe; dies trifft mindestens für die Zähigkeit, die Oberflächenspannung und den Siedepunkt zu. Die von Kohlenwasserstoffen mit mehreren Kohlenstoffatomen abgeleiteten Alkohole sowie die mehrwertigen Alkohole - solche mit mehreren Hydroxylgruppen -, zu denen Glyzerin gehört, weisen hingegen wesentlich größere Ähnlichkeit mit den öligen Verbindungen unter den Kohlenwasserstoffen auf.

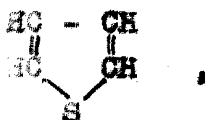
Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß in der Systematik der organischen Chemie von den Alkoholen leicht die Verbindung zu den Äthern mit der allgemeinen Strukturformel $R^{(1)} - O - R^{(2)}$ hergestellt werden kann. In den Vereinigten Staaten von Amerika hat der Diisopropyläther



als Zusatz zur Erhöhung der Klopffestigkeit ziemliche Bedeutung erlangt. Dies hat zum Teil darin seinen Grund, daß er wesentlich billiger hergestellt werden kann, als Iso-Oktan oder Isopentan. Deren klopfverbessernde Wirkung übertrifft er, weil seine Misch-Oktanzahl etwa bei 110 liegt, wie aus Abb. 20 zu ersehen ist.

Die hohe Klopffestigkeit dieses Äthers erscheint bei Berücksichtigung seiner Struktur verständlich. Die Kupplung der beiden Isopropylradikale durch den Sauerstoff ist ziemlich lose; die beiden Molekülhälften sind dadurch wie bei allen Äthern gegeneinander leicht beweglich, was ein Grund für die bekannte Flüchtigkeit dieser Verbindungsgruppen ist. Durch Sauerstoffangriff zerfällt daher der Isopropyläther höchstwahrscheinlich in die beiden Radikale, die vermutlich ähnlich klopffest sind wie das Propan, dessen Klopffestigkeit mit über 125 angegeben wird.

Es mögen noch einige Worte über den Einfluß des Schwefels gesagt werden. Er kann fast in allen einfachen funktionellen Gruppen den Sauerstoff ersetzen. Dadurch entstehen Schwefelalkohole (Merkaptane), Schwefeläther (auch Thioäther genannt) usw. Weiterhin erscheint er kernsubstituiert in dem bei der Hochtemperatur-Entgasung der Steinkohle entstehenden Thiophen von der Strukturformel



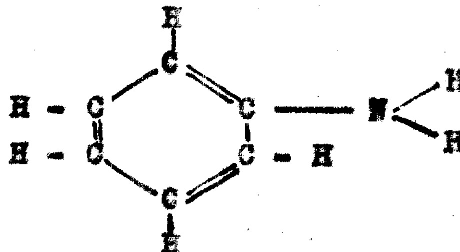
dessen Siedepunkt nur 3,6° C über dem des Benzols liegt. Es kann daher von diesem durch fraktionierte Destillation kaum getrennt werden. Es entsteht, wie andere ähnliche Begleitstoffe, bei der Hochtemperatur-Entgasung aus dem Schwefelgehalt der Kohle. Auch aus Erdöl gewonnene Kraftstoffe enthalten je nach dem Rohöl kleine Mengen Schwefel. Abgesehen von den

sonstigen unangenehmen Eigenschaften (wie schlechtem Geruch, Werkstoffangriff bei der Lagerung und durch Schwefeldioxydbildung in den Verbrennungsgasen) fördert der Schwefel das Klopfen. Seine Aktivität beim Ablauf der Reaktionsketten findet eine Parallele in der Grenzflächenaktivität, die bei den sog. Compound-Schmiermitteln für besonders hohe Beanspruchungen technisch genutzt wird.

5. Gegenklopfmittel und Zündbeschleuniger

Es wurde schon bei der Besprechung der Mischoktanzahlen darauf hingewiesen, daß es Stoffe gibt, deren Misch-Oktanzahlen besonders im Bereiche kleiner Beimischungen extrem hohe Werte annehmen. Es entspricht dies einem sehr steilen Anstieg der Kurve d an der linken Grenze des Diagramms in Abb. 16. In dieser Weise wirkende Stoffe können bereits als Katalysatoren angesehen werden, obwohl die Grenze zwischen ihnen und den hoch klopffesten Kraftstoff-Komponenten unscharf ist. Die Wirkung dieser Stoffe besteht darin, auch in kleiner Konzentration die angelaufenen Reaktionsketten abzubrechen und damit das Entstehen klopfender Verbrennung zu hemmen. Es gibt nach den bisherigen Forschungen zwei Gruppen von solchen Gegenklopfmitteln, und zwar Aminoverbindungen und metallorganische Verbindungen.

Der einfachste Vertreter der hier vornehmlich in Frage kommenden aromatischen Aminoverbindungen ist das Anilin $C_6H_5 \cdot NH_2$ mit der Strukturformel



In ihr erscheint am Benzolring ein Wasserstoffatom durch die

sogenannte Aminogruppe - NH_2 ersetzt. Die Wirkung von Anilin auf die Klopffestigkeit ist rund 12mal größer als die von Benzol oder Isooktan und kommt daher bereits bei Zusätzen in der Größenordnung von weniger als 1 % zur Geltung. Man hat seine Wirkung bei der Untersuchung anderer Gegenklopfmittel als Maßstab gewählt und drückt deren Einfluß auf die Klopffestigkeit in sogenannten Anilinäquivalenten aus; d.h. daß von einem Gegenklopfmittel mit dem Anilinäquivalent x die Menge $\frac{1}{x}$ Mole je Kraftstoffmengeneinheit erforderlich ist, um die gleiche Wirkung zu erzielen, wie mit einem Mol Anilin. In Zahlentafel 2 ist die Gegenklopfwirkung einiger Aminoverbindungen hauptsächlich nach Lovell, Campell und Boyd sowie nach Midgley und Boyd wiedergegeben [31].

Eine Erklärung für die Wirkung der Aminoverbindungen konnte bisher noch nicht gegeben werden. Der Stickstoff allein ist offensichtlich nicht die Ursache, denn Ammoniak NH_3 sowie Nitrite und Nitroverbindungen sind als ausgesprochen klopfsteigernd bekannt. Bei den zuletzt genannten bestehen sogar ähnliche Wirkungen wie bei Peroxyden, die jedoch durch die Sauerstoffatome hervorgerufen sein dürften. Rechnet man die Gegenklopfwirkung auf Grammatome Stickstoff um und setzt ihren relativen Betrag für Anilin gleich 1, so ergeben sich abhängig von der Zahl der Kohlenstoffatome je Molekül Zusammenhänge mit ihrer Struktur, wie sie in Abb. 21 wiedergegeben sind. Mögen diese Stoffe auch praktisch von untergeordneter Bedeutung sein, so erscheint es nicht ausgeschlossen, daß eine weitere Durchforschung ihrer Reaktionskinetik Aufschluß über die der klopfenden Verbrennung bringt und damit für die Praxis doch von erheblichem Nutzen sein kann.

Ungleich wirksamer als die Aminoverbindungen sind die metallorganischen, von denen eine größere Anzahl mit Angabe ihrer in Anilinäquivalenten ausgedrückten Gegenklopfwirkung in Zahlentafel 3 zusammengestellt ist. Wie daraus hervorgeht, sind es vor allem Bleiverbindungen (Gruppe IV b des periodischen Systems), dann Verbindungen des ihm im periodischen System be-

nachbarten Wismuts aus der Gruppe V b, weiterhin Verbindungen der beiden in Gruppe VI b stehenden Elemente Selen und Tellur. Sehr wirksam sind auch noch die beiden Carbonyle von Eisen und Nickel aus der Gruppe VIII, von denen das erstere in Deutschland eine Zeitlang praktische Bedeutung hatte.

Bei der Betrachtung der Zusammenstellung ist es nicht verwunderlich, daß heute fast ausschließlich Bleitetraäthyl (englisch: Tetraethyl lead, abgekürzt TEL bezeichnet) Verwendung findet. Da es giftig ist, muß bei der Verwendung gebleiter Benzine Vorsicht geübt werden. Es ist eine farblose Flüssigkeit mit einer Wichte von 1,65 g/cm^3 und einem Siedepunkt von etwa 200° C, bei dem es sich jedoch schon zu zersetzen beginnt. Ausgangsstoffe für seine Gewinnung sind Blei und Kochsalz. Zu Anfang seiner Verwendung machten sich stärkere Bleioxydablagerungen in den Motoren bemerkbar; man ist deswegen dazu übergegangen, es in Mischung mit Äthylendibromid $CH_2Br - CH_2Br$ im Verhältnis zwei Teile Bleitetraäthyl zu einem Teil Äthylendibromid zu verwenden. Äthylendibromid hat eine Wichte von 2,18 g/cm^3 und einen Siedepunkt von 131,6° C. Da sein Schmelzpunkt bei 10° C liegt, wird es in Fällen, in denen gebleite Kraftstoffe bei tiefen Außentemperaturen verwendet werden sollen, teilweise durch Äthyldichlorid ($CH_2Cl - CH_2Cl$) ersetzt. Dieses hat eine Wichte von 126 g/cm^3, einen Schmelzpunkt von -35,3° C und einen Siedepunkt von 83,7° C. Beide Äthylenhalogenide bewirken, daß sich das Bleioxyd zu flüchtigem Bleibromid und -chlorid umsetzt und dadurch die Ablagerungen vermieden werden.

Man nimmt heute an, daß die Wirkung der metallorganischen Verbindungen nur dann zustande kommt, wenn das Metall möglichst oxydierend und in feiner, molekulardisperser Verteilung auf das verbrennende Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch einwirken kann. Auch besitzen die Metalle, deren Verbindungen wirksame Klopfverbesserer sind, durchwegs zwei Oxydationsstufen, so daß die Annahme berechtigt erscheint, diese Tatsache als Voraussetzung für Klopfverbesserung anzusehen. Dadurch, daß die Metallatome während der Verbrennung erhalten bleiben und ihre kettenabbrechende

Wirkung nicht beeinträchtigt wird, erklärt sich wohl ihre wesentliche größere Wirksamkeit gegenüber den Aminoverbindungen, die durch die Verbrennung vollkommen zerstört werden.

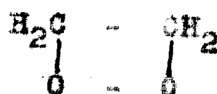
Die Zumischung von Bleitetraäthyl verändert die Klopffestigkeit der einzelnen Kohlenwasserstoffgruppen recht verschieden. Zunächst einmal ist seine klopfverbessernde Wirkung ganz allgemein um so größer, je klopffreudiger ein Kohlenwasserstoff ist; denn die Gelegenheit, die Reaktionsketten abzubrechen, ist denn am größten. Die sogenannte Bleiempfindlichkeit ist daher, grob gesprochen, bei Paraffinen größer als bei reinen Aromaten. Es zeigt sich jedoch, daß auch die Olefine trotz ihrer an sich besseren Klopffestigkeit sehr bleiempfindlich sind, und zwar um so mehr, je mehr Verzweigungen sie aufweisen und je näher die Doppelverbindung in der Mitte des Moleküls ist. Dies läßt sich so erklären, daß beim Zerfall der Moleküle um so kompaktere Radikale übrig bleiben, deren schneller Abbau durch das anwesende Gegenklopfmittel kräftig gehemmt wird.

Im einzelnen zeigen sich jedoch recht bemerkenswerte Zusammenhänge. Die schon wiederholt genannten amerikanischen Forscher Lovell, Campell und Boyd haben auf Grund ihrer zahlreichen Versuche die in Abb. 22 wiedergegebene Darstellung veröffentlicht. Sie setzt die Änderung des kritischen (d.h. des höchsten nutzbaren) Verdichtungsverhältnisses in Beziehung zum Verdichtungsverhältnis selbst und zeigt, daß die Bleiempfindlichkeit auch negative Werte annehmen kann. Die miteingezeichnete allgemeine Parabel für $\Delta \varepsilon_{kr}$ mit dem Exponenten x wurde von W. Jost [6, S. 557] auf Grund folgender Überlegungen abgeleitet: Die durch den Bleitetraäthylzusatz erreichte Hemmung der Kettenreaktionen wird bei einem bestimmten Kraftstoff durch Steigerung der Verdichtung von dem Werte ε_{kr} um $\Delta \varepsilon_{kr}$ wieder wettgemacht. Da der Reaktionsablauf in erster Linie von der Temperatur abhängt, eine Temperatursteigerung aber eine um so größere Steigerung der Verdichtung verlangt, je größer diese selbst bereits ist, folgt die in das Bild eingeschriebene Beziehung zumindest innerhalb einer homologen Reihe. Wegen weite-

rer diesbezüglicher Zusammenhänge, über die umfangreiches Versuchsmaterial, besonders von amerikanischer Seite vorliegt, kann auf das Schrifttum verwiesen werden [6, 31].

Die günstigen Erfahrungen, die man mit den sehr wirksamen Gegenklopfmitteln machte, ließen den Gedanken aufkommen, danach zu forschen, ob es nicht auch Stoffe gibt, die sich bei Dieselkraftstoffen in ähnlicher Weise bewähren. Einen Anhaltspunkt für die Richtung, in der die Untersuchungen zu führen waren, gab die Peroxyd-Theorie des Klopfens. Denn da eindeutig erkannt war, daß Peroxyde das Klopfen im Motor fördern, konnte man erwarten, daß sich ihre Anwesenheit bei zündträgen Dieselkraftstoffen in einer Erhöhung der Zündwilligkeit bemerkbar machen wird.

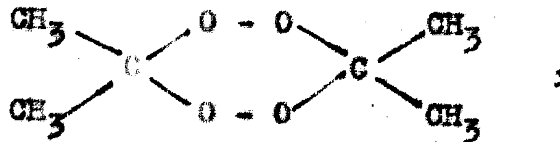
Nach A. R. Ubbelohde [32] sind Peroxyde vom Typus des Wasserstoffperoxyds H_2O_2 und Alkylperoxyde, also Verbindungen mit der Strukturformel H - O - O - H, R - O - O - H oder $R^{(1)}$ - O - O - $R^{(2)}$ schon in Konzentration von 0,01 % und darunter wirksam, weiterhin Verbindungen wie Alkylnitrite R - O - NO und Alkylnitrate R - O - NO_2. Es sind also Stoffe, die durch Trennung der O - O - oder der O - N - Bindung leicht zerfallen können. Dagegen sind Äthylenperoxyd mit der Strukturformel



oder höherer Homologe, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch aliphatische Radikale ersetzt sind, unwirksam. Offenbar erweist sich die zur O - O - Bindung parallele C - C - Bindung bei genügender Kleinheit der Radikale als sehr stabil. Man hat deshalb versucht, Peroxyde der zuerst beschriebenen Art als Zündbeschleuniger zu verwenden. So haben C. D. Boerlage und J. J. Broeze [33] Ergebnisse ihrer Untersuchungen der Wirkung von Tetralinperoxyd veröffentlicht, die wohl eine Steigerung der in Zetanzahlen ausgedrückten Zündwilligkeit erkennen lassen, sich jedoch in keiner Weise mit der Wirkung von Bleitetra-

äthyl oder einem anderen Gegenklopfmittel auf die Klopffestigkeit vergleichen lassen.

In Deutschland wurden Untersuchungen in dieser Richtung insbesondere im Institut für Chemische Technologie der Technischen Hochschule in München durchgeführt 34 . Unter den dort untersuchten Peroxyden erwiesen sich als die wirksamsten das Dimethylperoxyd $CH_3 - O - O - CH_3$ und das Diäthylperoxyd $C_2H_5 - O - O - C_2H_5$, die zu der schon von Ubbelohde als wirksam erkannten Gruppe gehören. An dritter Stelle steht das Diazeton-Diperoxyd mit der Strukturformel



die zeigt, daß die Moleküle dieser Verbindung offenbar an beiden parallelen O - O - Bindungen leicht in sehr aktive Radikale zerfallen können.

Wenn sich auch diese Stoffe als geeignet erweisen, die Zündung von Dieselkraftstoffen zu verbessern und den Diagrammverlauf günstiger zu gestalten, so haben sie sich bisher in der Praxis nicht durchsetzen können. Einer der Hauptgründe dürfte wohl darin liegen, daß durch oxydationsfördernde Zusätze die Lagerfähigkeit von Kraftstoffen beeinträchtigt wird. Sind es doch gerade die Peroxyde, die für die Harzbildung verantwortlich gemacht werden, so daß der Vorteil der Erhöhung der Zündwilligkeit durch die Gefahr schnellerer Harzbildung erkauft wird. Diese könnte wohl durch Inhibitoren eingedämmt werden, doch scheut die Praxis meist so umständliche Wege. Hierzu kommt, daß, wie im Abschnitt I 3 ausgeführt wurde, der Zündverzug nicht nur von chemischen Eigenschaften abhängig ist, wenn sie auch bei den im Dieselmotor herrschenden Temperaturen eine überragende Rolle spielen. Nur kann durch katalytisch wirkende Zusätze der Ablauf der physikalischen Vorgänge wie Zerstäubung, Verdampfung, Durchmischung usw. in keiner Weise beeinflußt werden. Diese sind aber, wenn auch nicht ausschließlich für den Zündverzug, so doch für den ganzen Ablauf der Verbrennung und

somit für den Gang des Motors von Bedeutung.

Daraus ergibt sich mit ziemlicher Klarheit, daß trotz gewisser äußerlicher Ähnlichkeiten erhebliche Unterschiede zwischen der Wirkung von Gegenklopfmitteln und Zündbeschleunigern bestehen, Gegensätze, die auf die wiederholt betonten Unterschiede der beiden Motorarten zurückzuführen sind. Man muß sich daher hüten, nur deshalb, weil gewisse Parallelerscheinungen zu erkennen sind, zu erwarten, daß die Entwicklung in vollkommen gleicher Richtung verläuft.

Der einfachste Weg zur Verbesserung zündträger Dieselkraftstoffe ist bis heute das Beimischen der aus der Fischer-Tropsch-Synthese gewonnenen äußerst zündwilligen Kogasine, was im Abschnitt 4 b näher besprochen wurde. Im übrigen bieten sich beim Dieselmotor für den Motorenbauer wesentlich mehr Möglichkeiten, durch Gestaltung und Unterteilung des Verbrennungsraumes die günstigsten Bedingungen für den gewünschten Ablauf der Verbrennung zu schaffen. Dazu wird ihm eine Kenntnis der chemischen Voraussetzung immer nützlich sein.

Auf dem Gebiete der Ottokraftstoffe strebt die Technik heute danach, sowohl die durch das Bleitetraäthyl gebotenen Möglichkeiten zu nutzen als auch durch Anwendung der verschiedenartigsten Verfahren wie Kracken, Polymerisieren, Alkylieren usw. die aus Erdöl, Naturgas und festen Brennstoffen gewonnenen Kraftstoffe besonders klopffest zu machen. Sicherlich nicht unbeeinflußt durch die Entwicklung auf verwandten chemisch-technischen Arbeitsgebieten setzt sich dabei immer mehr das Streben durch, chemisch reine Verbindungen mit hervorragenden Eigenschaften zu erzeugen, wie dies beim Iso-Oktan, Isopentan und einigen anderen nicht namentlich erwähnten Verbindungen bereits der Fall ist. Durch die Bereitstellung großer Mengen solcher Kraftstoffe erwächst auch hier dem Motorenbauer die Aufgabe, den Ottomotor so weiter zu entwickeln, daß die durch die Arbeiten der Kraftstoffchemiker vorbereiteten Fortschritte in großem Umfange nutzbar gemacht werden können.

II. Beitrag zur Klärung offener Fragen in den letzten Jahren

1. Die Klopfwert- und Zündwilligkeitsermittlung mit Hilfe von Prüfmotoren

Für praktische Zwecke reichen nach dem heutigen Stand der Forschung die Hilfsmittel der Strukturchemie, der Reaktionskinetik und der Thermodynamik nicht aus, um die Klopffestigkeit oder Zündwilligkeit eines gegebenen Kraftstoffes zu berechnen. Die bis jetzt gewonnenen Erkenntnisse genügen nicht für eine quantitative Auswertung, so aufschlußreich sie auch sind. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als die Betriebseigenschaften der Kraftstoffe im Motor selbst zu ermitteln. Seit den von Ricardo unternommenen diesbezüglichen Versuchen wurden verschiedene Bauarten von Prüfmotoren entwickelt, in denen unter mehr oder weniger voneinander abweichenden Bedingungen die Klopffestigkeit von Ottokraftstoffen bestimmt werden kann. Die wichtigsten, heute verwendeten Motorbauformen sind der sog. CFR-Motor des Cooperative Fuel Research Committee der American Society of Automotive Engineers und der I.G.-Prüfmotor des Technischen Prüfstandes der I.G.-Farbenindustrie AG. Oppau. Beide Motoren sind einander ziemlich ähnlich. Die axiale Verschiebung des Zylinders zur Veränderung des Verdichtungsverhältnisses wird mit Hilfe einer Schnecke und eines Schneckenrades sowie eines auf der Außenseite der Zylinderlaufbüchse sitzenden Gewindes bewerkstelligt; das Gegengewinde befindet sich an der Innenseite des axial festgehaltenen Schneckenrades. Bei dem I.G.-Prüfmotor kann auf einer Trommel gleichzeitig das Verdichtungsverhältnis und die zugehörige Oktanzahl abgelesen werden. Durch Kupplung des Motors mit einer Synchronmaschine wird die Konstanz seiner Drehzahl erreicht.

Beide Prüfmotor-Bauarten sind zur Bestimmung des Klopfens mit dem schon 1922 von Midgeley entwickelten Springstab (bouncing pin) ausgerüstet. Bei diesem wird die Bewegung einer Membran auf einen Stab übertragen, der durch die im Zylinder auf-

tretende Druckänderung hochgeschleudert wird und zwei elektrische Kontakte schließt, sobald das Klopfen eine bestimmte Stärke erreicht hat. Die Dauer der Berührung der Kontakte wird über eine Elektrolytzelle von einem sehr stark gedämpften elektrodynamischen oder von einem Hitzdrahtinstrument angezeigt. Trotz zahlreicher Versuche, diese Meßeinrichtungen zu verbessern oder durch geeignetere Verfahren zu ersetzen, hat der Springstab als Klopfmesser bis heute seinen Platz behauptet [35]. Er ist verhältnismäßig einfach zu handhaben.

Ein neuer Weg, den Beginn des Klopfens objektiv festzustellen, wurde von der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) eingeschlagen [36]. Schon bei der Beschreibung der Klopfvorgänge wurde auf die Tatsache hingewiesen, daß sich der Beginn des Klopfens durch eine deutliche Erhöhung des auf die Zeit bezogenen Druckanstieges dp/dt im Zylinder bemerkbar macht. Dieser Wert steigt beim Klopfen auf den vier- bis zehnfachen des Normalwertes an. Noch deutlicher läßt sich der Klopfbeginn erkennen, wenn die zweite Ableitung des Druckes nach der Zeit, nämlich d^2p/dt^2, also die Änderung des Druckanstieges, gemessen wird, deren Größenordnung bei klopfendem Betrieb ein Hundertfaches des Normalwertes erreichen kann. Trägt man diesen Wert in Abhängigkeit von einer Betriebskenngröße auf, die man bei der Prüfung geändert hat, so macht sich der Klopfbeginn durch einen ausgeprägten Knick im Kurvenverlauf bemerkbar, wie dies Abb. 23 erkennen läßt.

Zur Messung des Klopfausschlages wird ein Quarzdruckmeßsystem verwendet, dessen Impulse über einen Verstärker auf ein Schreibgerät übertragen werden. Der Druckgeber ist so gedrungen ausgeführt, daß er auch unter schwierigen räumlichen Bedingungen an einem Zylinder angebracht werden kann. Damit ist die Möglichkeit gegeben, nicht nur eigens gebaute Prüfmotoren, sondern auch Betriebsmaschinen, selbst solche mit mehreren Zylindern, zu untersuchen; bei diesen stieß eine Klopfmessung bisher auf große Schwierigkeiten.

Wegen näherer Einzelheiten des Gerätes, das auf dem Prüfstand von einem Monteur ohne weiteres bedient werden kann, sei

auf die angeführten Arbeiten verwiesen. Um zu einem Meßergebnis zu kommen, müssen allerdings die ähnlich wie bei Temperaturschreibern aufgenommenen, aus einzelnen Punkten zusammengesetzten Kurven ausgewertet werden.

Die Oktanzahl von Kraftstoffen wird nun in den erwähnten Prüfmotoren nach mehreren voneinander abweichenden Verfahren bestimmt, deren wichtigste Daten in Zahlentafel 4 zusammengestellt sind. Es sind dies:

a) das alte Research-Verfahren, wie es früher vom Cooperative Fuel Research-Committee angewendet wurde;
b) das Motor-Verfahren nach den Vorschlägen der American Society for Testing Materials (auch ASTM-Verfahren genannt);
c) das in Großbritannien eingeführte sog. Flieger-Verfahren des British Air Ministry (auch abgewandeltes Motor-Verfahren genannt);
d) das von den Laboratorien der Esso-Gesellschaft des Standard-Konzerns vorgeschlagene LT-(Low-Temperature-)Verfahren für Kraftstoffe mit Spaltbenzin- und Benzolzusätzen;
e) das sog. L 3-Verfahren der Ethyl-Cooperation für gebleite Kraftstoffe;
f) das im Jahre 1939 auf Grund der Empfehlungen des Cooperative Fuel Research Committee gegenüber dem ursprünglichen abgeänderte neue Research-Verfahren.

In der letzten Spalte der Zahlentafel 4 sind auch die von US-Army Air Corps vorgeschriebenen Versuchsbedingungen aufgeführt, für die jedoch ein etwas anders gebauter Motor verwendet wird; vor allem wird das Klopfen nicht durch ein Springstabgerät angezeigt, sondern durch die Temperatur im Verbrennungsraum mit Hilfe eines Thermoelementes gemessen.

Der Grund für die Wahl verschiedener Betriebsbedingungen ist durch das Bestreben zu erklären, sie möglichst den Verhältnissen des praktischen Betriebes im Flugzeug oder im Kraftwagen anzupassen. Dies ist jedoch nur im beschränkten Maße möglich, weil aus der Bestimmung des Klopfwertes noch keine unbedingt

zutreffenden Schlüsse auf das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb gezogen werden können. Über die Notwendigkeit, Kraftstoffe auch im Fahrbetrieb zu erproben, besteht keinerlei Zweifel.

Das Cooperative Fuel Research-Committee hat daher bereits im Jahre 1931 Untersuchungen darüber angestellt, wieweit die Ergebnisse des Research-Verfahrens brauchbare Unterlagen dafür bieten, das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb zu beurteilen. Als Ergebnis der in den Jahren 1932, 1934 und 1937 durchgeführten Fahrversuche wurde dann das unter f) genannte neue Research-Verfahren entwickelt. Trotz der bei diesen Versuchen im einzelnen festgestellten Abweichungen war die Übereinstimmung zwischen Laboratoriumsversuchen und Ergebnissen des praktischen Betriebes besser, als dies bei einigen bis dahin in Deutschland durchgeführten Untersuchungen der Fall war [37]. Der Grund hierfür dürfte wohl darin liegen, daß in den Vereinigten Staaten von Amerika im allgemeinen Kraftstoffe chemisch ähnlicher Beschaffenheit verwendet werden. Handelt es sich doch fast ausschließlich um solche, die aus Erdöl gewonnen sind, wobei die Rohöle keine allzu großen Unterschiede aufweisen. Benzine niedriger Oktanzahlen sind meist straight run-Benzine, solche hoher Oktanzahlen Krackbenzine.

In Deutschland lagen die Verhältnisse in dieser Beziehung viel schwieriger, weil neben den aus Erdöl gewonnenen, teils einheimischen, teils ausländischen Benzinen mit an sich größeren Unterschieden in der chemischen Struktur der Rohöle auch noch Synthese-Benzine, Hydrier-Benzine und solche mit reichlichem Benzol- oder Alkoholzusatz verwendet wurden. Eine Voraussage über das Verhalten solcher Kraftstoffe im Fahrbetrieb auf Grund der Oktanzahlbestimmung im Prüfmotor ist daher viel schwieriger. Aus einer Mitteilung von W. Witschakowski [38] ist wohl bekannt, daß diesbezügliche Untersuchungen noch in den letzten Jahren von verschiedenen Behörden und anderen Stellen in größerem Maßstab geplant waren, doch liegen Veröffentlichungen hierüber nicht vor.

Zur Erprobung eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb

gehört auch die Klopfmessung an Mehrzylindermaschinen. Sie bietet zusätzliche Schwierigkeiten, weil das Klopfen nicht in allen Zylindern gleichzeitig eintritt und wegen des Betriebsgeräusches an sich schwerer festzustellen ist. Von erheblichem Einfluß ist die Verteilung des Kraftstoff-Luft-Gemisches auf die einzelnen Zylinder, die z.B. wieder durch die Verdampfbarkeit des Kraftstoffes, die Motordrehzahl und die Stellung der Drosselklappe geändert wird [39]. Auf diesem Gebiete können noch umfangreiche Forschungsarbeiten geleistet werden. Doch bleibt dabei offen, ob es möglich ist, durch Einführen von immer neuen Veränderlichen Erkenntnisse zu gewinnen, die verallgemeinerungsfähige Schlüsse auf andere Verhältnisse gestatten.

Bei der Ermittlung des Zündverzuges liegen die Verhältnisse in mancher Hinsicht einfacher. Aus den Ausführungen im Abschnitt I 3 ging bereits hervor, daß der Zündverzug zwar eine Größe ist, die von verschiedenen physikalischen Vorgängen und chemischen Eigenschaften abhängt. Da aber erfahrungsgemäß, wie dort erläutert wurde, die Einflüsse der chemischen Zersetzung des Kraftstoffes im Vordergrund stehen, spielen die Motorbauarten und Betriebsbedingungen keine so große Rolle, wenn es sich darum handelt, Vergleichswerte zu erhalten. Diese Tatsache bleibt bestehen, obwohl die absolute Dauer des Zündverzuges selbstverständlich Änderungen unterliegt, wenn Motorbauart oder Betriebsbedingungen geändert werden. Dadurch erklärt sich die bemerkenswerte Feststellung, daß sehr verschieden arbeitende Verfahren zu einer ungefähr übereinstimmenden Bewertung der Dieselkraftstoffe führen, wobei allerdings nicht verschwiegen werden darf, daß die Streuung innerhalb der Meßwerte größer ist, als bei der schon sehr verfeinerten Oktanzahlbestimmung. Daß die Zündwilligkeit in Zetanzahlen ausgedrückt wird, wobei eine Zetanzahl von 76 gleich ist einem Werte von 100 für die früher gebräuchliche Zetenzahl, wurde bereits erwähnt, desgleichen die praktisch uneingeschränkte Gültigkeit eines additiven Gesetzes bei Mischungen. Einzelheiten über die Meßverfahren folgen im Abschnitt c.

a. Die Gemeinschaftsarbeit an der Klopfwertmessung von Ottokraftstoffen unter Führung des Oppauer Prüfstandes der I. G. - Farbenindustrie AG.

Über die Geschichte des Oppauer Prüfstandes und die der dort angewendeten Meßverfahren hat W. Wilke, dessen Initiative auf diesem Gebiete in Deutschland bahnbrechend wirkte, berichtet [40]. Da bereits Mitte der 30er Jahre die Einfuhr amerikanischer CFR-Motoren in das Deutsche Reich auf devisenpolitische Schwierigkeiten stieß, ging man hier dazu über, den bereits erwähnten, von der I.G. entwickelten Prüfmotor in zunehmendem Maße für die Klopfwertbestimmung zu verwenden. Er ist in Abb. 24 in zwei Schnitten wiedergegeben.

Um die an die Klopfwertmessung gestellten Aufgaben nach einheitlichen Richtlinien lösen zu können und die auf verschiedenen Prüfständen gesammelten Erfahrungen auszutauschen, wurden vom technischen Prüfstand der I.G.-Farbenindustrie AG. in Ludwigshafen-Oppau zusammen mit anderen interessierten Stellen Vergleichsversuche angestellt. Die Teilnahme daran war in ständigem Anstieg begriffen. Einen Überblick hierüber und über die dabei erzielten Ergebnisse bezüglich der mittleren Streuung zeigt Zahlentafel 5. Von den aufgezählten Motoren waren zum Schluß etwa zwei Drittel I.G.-Prüfmotoren und ein Drittel CFR-Motoren. Die beiden Abb. 25 a und b zeigen den Zusammenhang zwischen der Zahl der Meßwerte und den Streugrenzen, wie sie sowohl mit dem Research- als auch mit dem Motorverfahren in der letzten der angeführten Versuchsreihen erzielt wurden [41].

Als Ergebnis der früher durchgeführten Arbeiten kann eine bemerkenswerte Steigerung der Meßgenauigkeit bei der Oktanzahlbestimmung festgestellt werden [42]. Dieses Ziel wurde dadurch erreicht, daß zunächst die Einzelheiten der Betriebsbedingungen geklärt wurden, um die Voraussetzungen für vergleichbare Untersuchungen zu schaffen. Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit den Prüfstellen des Zentralbüros (ZB) für Mineralöle die

Eignung der Bezugskraftstoffe IG-Eichbenzin und Eichstoff Z (technisches Iso-Oktan) erprobt, die dann auf der Klopfmeßtagung im Juli 1941 allen Abnahmestellen zur Anwendung empfohlen werden konnten. Zur Bestimmung der Bleiempfindlichkeit wurde vom Oppauer Prüfstand das sog. Oppauer Liniennetz entworfen, das als Ordinate in linearer Teilung die Oktanzahl, als Abszisse eine durch zahlreiche Versuche ermittelte, der logarithmischen ähnliche Teilung für den Zusatz von Bleitetraäthyl in cm^3 je Liter zeigt. Der Zweck dieses Liniennetzes ist der, die Kurve für die Bleiempfindlichkeit der Kraftstoffe als Gerade erscheinen zu lassen. Wie jedoch von Köhler veröffentlichte Ergebnisse zeigen, trifft dies wohl für viele, nicht aber für alle Kraftstoffe zu [43].

Ein ähnliches Ziel wie mit dem Oppauer Liniennetz sollte auch mit der schon vorher empfohlenen "Ethyl Blending Chart" von Hebl, Rendel und Garton erreicht werden [44]. Diese zeigt auf der Ordinate die Oktanzahlen in etwa quadratischer Teilung und für den Bleitetraäthylzusatz auf der Abszisse eine mit dem Abstand vom Ursprung enger werdende Teilung; die Ordinaten sind aber nicht parallel, vielmehr nimmt ihr Neigungswinkel gegen die Abszisse, von der Nullachse ausgehend, zunächst ab und dann wieder zu. Die in Anmerkung [44] genannten Verfasser hatten im Zusammenhang mit dem Liniennetz der Blending Chart den Begriff der Bleiempfindlichkeit S_L (lead susceptibility) vorgeschlagen. Diese kann aus der Richtung der in die Blending Chart einzutragenden Geraden für irgend einen Kraftstoff abgelesen werden. Sowohl gegen die Ethyl Blending Chart als auch gegen das Oppauer Liniennetz wendet Th. Hammerich ein, daß ihre Zuverlässigkeit fragwürdig erscheint, weil die Diagrammpunkte rein empirisch ermittelt seien [45]. Hammerich unternimmt es, ein mathematisch einfaches Gesetz für die Wirkung von Bleitetraäthyl aufzustellen, aus dem er den Begriff der sog. mathematischen Bleiempfindlichkeit E_m von Kraftstoffen entwickelt. Er führt an Hand von sehr vielen Zahlenangaben den Nachweis für die Richtigkeit seines Vorschlages, der sowohl für das Motor- als auch

für das Research-Verfahren anwendbar sei. Ohne damit die Brauchbarkeit dieses Begriffes in Zweifel ziehen zu wollen, kann doch grundsätzlich darauf hingewiesen werden, daß es nicht zulässig erscheint, im Zusammenhang mit der Oktanzahl von einer strengen mathematischen Gültigkeit irgend eines Zusammenhanges zu sprechen, denn die Oktanzahl selbst entbehrt als empirische Größe, die von sehr vielen, rechnerisch kaum zu erfassenden Einflüssen abhängig ist, der Grundlage hierfür. Dies vermerkt auch mit Recht Singer in seiner Stellungnahme. Hammerich geht von der Erfahrung aus, daß die in Prozenten ausgedrückte Erhöhung Δ_{OZ} der Grundoktanzahl OZ_o von Kraftstoffen für gleichen Bleitetraäthylzusatz durch strahlenartig verlaufende Linien dargestellt werden kann; für verschiedene Gruppen von Kraftstoffen schneiden sich diese Linien in einem Punkte. Da sie außerdem bei zunehmendem Bleigehalt in Richtung der Abszissenachse in logarithmisch geteilten Abständen erscheinen, hat Hammerich das in Abb. 26 wiedergegebene Diagramm entworfen. Die beiden darin eingetragenen Randmaßstäbe dienen dazu, um die von ihm definierte und auf dem Diagramm eingetragene mathematische Bleiempfindlichkeit zu ermitteln, indem man die durch den entsprechenden Nullpunkt gehende Parallele bestimmt und den zugehörigen Wert am Rande abliest. Je flacher die Geraden im Diagramm verlaufen, desto größer ist die Bleiempfindlichkeit, d.h. desto geringer ist die für die Erhöhung um eine bestimmte Oktanzahl erforderliche Menge Bleitetraäthyl, oder, was dasselbe ist, desto größer ist die Steigerung des Klopfwertes mit einer bestimmten Menge des Gegenklopfmittels. Wenn man durch ein Diagramm die Abhängigkeit der mathematischen Bleiempfindlichkeit E_m vom Schwefelgehalt darstellt, so ergibt sich die bemerkenswerte Tatsache, daß die Punkte für gleichartige Kraftstoffe ziemlich gut durch stetige Kurven verbunden werden können, wie Abb. 27 zeigt. Der Schwefelgehalt beeinträchtigt also nicht nur die Klopffestigkeit, sondern auch die Bleiempfindlichkeit, worin sich offenbar seine besondere Aktivität bemerkbar macht. Er wirkt in dieser Hinsicht ähnlich wie der

Sauerstoff der Peroxyde. Es wird sich in der Praxis erweisen müssen, ob das Diagramm von Hammerich oder das Oppauer Liniennetz bevorzugt wird. Beide sind jedenfalls als brauchbare Hilfsmittel für die Vorausbestimmung der Erhöhung der Oktanzahl eines Kraftstoffes bei irgend einem Bleitetraäthyl-Zusatz geeignet, wenn die Wirkung für zwei verschiedene Zusatzmengen bekannt ist.

Als noch ungelöste Aufgabe der vom Oppauer Prüfstand veranstalteten Vergleichsmessungen nannte Wilke bei der 5. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung - vgl. Anmerkung [53] - insbesondere eine Erklärung für das Klopfverhalten der Synthesebenzine. Diese bereiten wegen der noch nicht erkannten Ursachen für die erhebliche Streuung der Meßwerte einer genauen Klopfwertbestimmung große Schwierigkeiten. Offenbar ist vor allem die Art der Lagerung bei Synthesebenzinen von erheblichem Einfluß, da sie, wie schon ausgeführt wurde, fast rein paraffinischer Natur sind. Nach Abb. 19 bestehen aber im Bereiche niedriger Kohlenstoff-Atomzahlen große Unterschiede selbst bei den Normalparaffinen. Es kann sich also durch Verlust von Butan infolge von Verflüchtigung die Klopffestigkeit merkbar erniedrigen. Weiterhin bedarf noch der Einfluß der in Synthesebenzinen enthaltenen Olefine einer eingehenden Prüfung. Die Olefine sind, wie bereits näher ausgeführt wurde, wesentlich klopffester als die unverzweigten Paraffine. Von Spaltbenzinen her ist jedoch bekannt, daß gerade die Olefine leicht zur Harzbildung neigen, was der Grund für die geringe Lagerfähigkeit solcher Benzine ist. Doch hat man erkannt, daß dies vornehmlich für die Diolefine und solche mit noch größerer Zahl von Doppelbindungen zutrifft. Die in Synthesebenzinen hauptsächlich anzutreffenden Monoolefine sind in dieser Hinsicht harmloser. Schließlich muß noch bei der Untersuchung von Synthesebenzinen die Möglichkeit der Bildung von Peroxyden beachtet werden. Es spielt dabei schon eine Rolle, ob die zu untersuchenden Proben auch nur kurze Zeit dem Tageslicht ausgesetzt waren, selbst in dunklen Flaschen, weil diese die Ultraviolett-

strahlung offenbar nicht genügend absorbieren. Dannefelser stellt daher am Ende seiner Arbeit [53] zu diesem Punkt die beiden noch zu klärenden Fragen:

a) Besteht eine zahlenmäßige Abhängigkeit der Oktanzahl von der Peroxydzahl, wenigstens jeweils für Synthesebenzine gleicher Oktanzahl und welche?

b) Bis zu welchem Grad lassen sich gebildete Peroxyde auswaschen und die ursprünglichen Oktanzahlen wieder herstellen?

Als Ergebnis der an Synthesebenzinen bisher durchgeführten Vergleichsversuche ergeben sich nach derselben Quelle folgende Tatsachen:

a) Die mittlere Streuung bei der Klopfwertmessung von Synthesebenzinen ist mehr als doppelt so groß gegenüber den anderen Versuchskraftstoffen und beträgt ± 1,2 OZ bei den Versuchen vom April 1942 und ± 1,4 OZ bei den Versuchen vom Oktober 1942.

b) Die Größenunterschiede zwischen einzelnen Messungen betragen 7 bis 11 OZ und damit das Zwei- bis Dreifache der sonst üblichen Werte.

c) Die Streuungen sind auffälligerweise unabhängig von Verdampfungsverlusten und Peroxydbildung und gleich groß bei Prüfung im CFR-Motor und im I.G.-Motor.

Von sonstigen besonderen Arbeiten einiger Prüfstellen, über die auf der 5. (letzten) Klopfmeßtagung berichtet wurde, sei die Bestimmung der Oktanzahlen von Flüssiggasen genannt [46]. Diese Arbeit war dadurch veranlaßt, daß über die Klopffestigkeit von Flüssiggasen und anderen als Kraftstoff in Frage kommenden Gasen im Schrifttum sehr stark voneinander abweichende Angaben zu finden sind. Es sollten deshalb die Versuchsbedingungen genau festgelegt werden, um wiederholbare Werte für die Klopfwertbestimmung zu erhalten, weil diese Kraftstoffe zusätzliche Einrichtungen wie Gasflaschen, Vorwärmer, Regler, Mischgeräte usw. erfordern. Änderungen daran sind nicht ohne Einfluß auf die Oktanzahl. Insbesondere spie-

len der in der Saugleitung herrschende Unterdruck und der Grad der Vorwärmung, die notwendig ist, weil das Gas bei der Entspannung aus der Flasche stark abgekühlt wird, eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Schließlich sei noch eine Arbeit von E. Singer [47] genannt, die über Versuche berichtet, einzelne Betriebsbedingungen des I.G.-Motors zu ändern, die sowohl beim Motorverfahren als auch beim Research-Verfahren gleich sind. Der Zweck der Versuche war festzustellen, wie sich diese Änderungen dann auswirken, wenn Kraftstoffe untersucht werden sollten, die von den üblichen abweichen. Es kommen insbesondere solche mit hohem Paraffingehalt, oder solche, die durch Zumischen von Benzol oder Alkohol hergestellt werden, in Frage. Dabei ergeben sich die in Zahlentafel 6 angegebenen Klopfwertänderungen, die erkennen lassen, daß sich die Bewertung insbesondere von bleihaltigen Kraftstoffen bei Änderungen der Betriebsbedingungen viel stärker ändert, als eine unter Normalbedingung gleichwertige Mischung aus n-Heptan und i-Oktan. Ähnlich liegen die Verhältnisse nach der Zahlentafel bei gebleiten Kraftstoffen, die Alkohol enthalten, nur daß bei diesen eine Änderung der Luftüberschußzahl, beim gebleiten Benzolkraftstoff dagegen die Änderung der Drehzahl ohne Einfluß ist.

Abschließend läßt sich sagen, daß die Arbeiten der letzten Jahre auf dem Gebiet der Oktanzahlbestimmung wesentliche Fortschritte gebracht haben, daß aber trotzdem noch eine Anzahl von Fragen offen ist, die eingehender Bearbeitung bedarf. Es ist vor allem nicht zu verkennen, daß die Oktanzahl selbst, wie von berufener Seite immer wieder betont wird, ein zur Zeit zwar unentbehrlicher, nichtsdestoweniger aber unzulänglicher Bewertungsmaßstab ist [6, S. 528; 31, S. 157; 48]. Dabei braucht man nicht so weit zu gehen, wie Scheunemann, der sie sogar als "Irrlicht der Erdölindustrie" bezeichnet [49].

Es darf aber nicht außer Acht gelassen werden, daß durch die Oktanzahlen die Kraftstoffeigenschaften mit Hilfe eines einzigen Wertes gekennzeichnet werden, was bei Kenntnis der

maßgebenden Einflüsse ohne Zweifel als ein kühnes Unterfangen angesehen werden muß. Deshalb verdient der im Nachstehenden zu besprechende Versuch, einen Kraftstoff durch sein Verhalten bei verschiedenen Bedingungen zu kennzeichnen, besondere Beachtung.

b. Das Überlade-Prüfverfahren der ehemaligen Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (Mehrpunktbewertung)

Veranlaßt durch die besonders bei hochwertigen Kraftstoffen offen zu Tage tretenden Unzulänglichkeiten der Oktanzahlbewertung hat es das Institut für Betriebsstoff-Forschung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) unternommen, ein neues Bewertungsverfahren für Ottokraftstoffe auszuarbeiten [50]. Es ist vor allem für sehr klopffeste Benzine gedacht, wie sie im Flugwesen verwendet werden.

Da die Überladung beim Flugmotor eine wichtige Rolle spielt und die Steigerung des Ladedruckes um so weiter getrieben werden kann, je klopffester der verwendete Kraftstoff ist, wurde nicht das Verdichtungsverhältnis, sondern der höchste zulässige Ladedruck als Maßstab für die Bewertung eines Kraftstoffes gewählt; vgl. hierzu auch Abschnitt I 2 d. Bei verschiedenen Luftüberschußzahlen wird nun sowohl der höchst zulässige Ladedruck $p_{L\ max}$ als auch der beim Betrieb an der Klopfgrenze zu erzielende mittlere nutzbare Kolbendruck p_{me} für verschiedene Ladelufttemperaturen gemessen. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung für einen Flugmotorkraftstoff, der nach dem Motorverfahren die Oktanzahl 87 hat, zeigt Abb. 28. Als Prüfmaschine dient ein luftgekühlter Einzylindermotor Baumuster BMW 132 N. Ursprünglich wurde der Klopfbeginn durch Abhören ermittelt. Nunmehr liegt das in der Einleitung zu Abschnitt B 1 erwähnte Gerät vor, das den Klopfausschlag d^2p/dt^2 mißt.

Bemerkenswert sind die Unterschiede, die sich nach diesem Prüfverfahren für Kraftstoffe verschiedenen chemischen Aufbaues

ergeben. Ein hoher Gehalt an Aromaten hat nämlich zur Folge, daß nicht nur die Minima der dargestellten Kurven höher liegen als bei paraffinischen oder naphthenischen, aus Erdöl gewonnenen Kraftstoffen. Der Anstieg der Kurven im Bereich günstiger Betriebsbedingungen ist noch viel steiler als bei dem in Abb. 23 erwähnten Beispiel, d.h. solche Kraftstoffe sind absolut genommen klopffester, jedoch auch empfindlicher gegen Verschlechterung der Betriebsbedingungen.

Die Bewertung von Kraftstoffen nach dem Überladeverfahren ist, was besonders betont werden soll, unabhängig von der mit einer gewissen Willkür behafteten Kenngröße OZ = 100 und gestattet ohne weiteres die Prüfung von Kraftstoffen mit höherer Klopffestigkeit als Iso-Oktan. Ein Vergleich mit dem Verhalten von reinem Iso-Oktan bereitet keine Verlegenheiten und läßt an Hand der Prüfkurven erkennen, worin die Verbesserung durch Verwendung eines solchen Kraftstoffes liegt.

c. Das Zündverzugsverfahren mit verschiedenen Prüfdieselmotoren

Nachdem vom Sonderausschuß zur Normung der motorischen Prüfung von Dieselkraftstoffen beim Verband für die Materialprüfungen der Technik (DVM) auf einer Tagung im April 1942 in Oppau eine Vereinheitlichung des Prüfverfahrens beschlossen wurde, genügt es, die Vorgeschichte nur kurz zu streifen.

Untersuchungen von Dieselkraftstoffen inländischer Herkunft wurden von der I.G.-Farbenindustrie bereits Anfang der 30er Jahre unternommen. Zunächst wurden langsam laufende Einzylindermotoren verwendet, später jedoch eine schnell laufende Bauart gewählt, die nunmehr nach einigen Änderungen und Anpassungen an die Erfordernisse der Zündwertprüfung als sog. I.G.-Prüfmotoren viel zur Zündwertbestimmung verwendet wird. Die Maschine ist in Abb. 29 in zwei senkrechten Schnitten längs und quer zur Welle dargestellt. Sie weist in manchen Punkten Ähnlichkeit mit dem I.G.-Prüfmotor für Ottokraftstoffe auf,

insbesondere was die Verstellung der Zylinderbüchse, des Zylinderkopfes und die Ventilbetätigung durch Kipphebel betrifft. Gemessen wird die Zeit des Zündverzuges, wobei grundsätzlich zwei Möglichkeiten bestehen. Das Verdichtungsverhältnis wird ungeändert gelassen und der mit der Zetanzahl der Kraftstoffe veränderliche Zündverzug in Grad Kurbelwinkel bestimmt. Es bietet jedoch Vorteile, statt dessen das Verdichtungsverhältnis so lange zu ändern, bis der Zündverzug einen festgelegten, für einwandfreien Betrieb als zweckmäßig erkannten Wert erreicht hat. Dies läßt sich an Hand der Abb. 30 a und b erläutern.

Betrachtet man z.B. die Veränderung des Zündverzuges mit der Zetanzahl bei gleichbleibendem Verdichtungsverhältnis ε = 16, so sieht man, daß mit dem so eingestellten Motor nur Kraftstoffe geprüft werden können, deren Zetanzahl etwa zwischen 18 und 43 liegt. Denn bei größeren Werten des Zündverzuges ist mit dem eingestellten Verdichtungsverhältnis kein einwandfreier Betrieb mehr möglich; der Kraftstoff zündet nicht mehr regelmäßig. Bei sehr zündwilligen Kraftstoffen werden aber die Unterschiede im Zündverzug bereits so klein, daß wegen des flachen Schnittes der Kurven mit den Ordinaten eine einigermaßen zuverlässige Bestimmung der Zetanzahl nicht mehr möglich ist. Man muß dann das Verdichtungsverhältnis doch ändern, um größere Meßbereiche erfassen zu können. Prüft man aber die Kraftstoffe derart, daß man durch stetiges Verändern des Verdichtungsverhältnisses einen bestimmten Wert des Zündverzuges erreicht, der beim I.G.-Prüfmotor auf 18° Kurbelwinkel festgelegt ist, so sieht man, daß man einen größeren Zetanzahlbereich erfassen kann, vorausgesetzt, daß das Verdichtungsverhältnis zwischen Grenzen geändert werden kann, die weit genug auseinander liegen. Beim I.G.-Prüfdieselmotor betragen sie 1 : 8 und 1 : 25. Durch Extrapolation der in Abb. 30 b wiedergegebenen Kurven ergibt sich, daß damit in einem Zetanzahlbereich zwischen etwa 12 und 55 gemessen werden kann. Ursprünglich wurde beim I.G.-Prüfmotor der Zündverzug mit Hilfe einer

Glimmlampe ermittelt, die beim Einspritzen zum Leuchten und beim Zünden zum Verlöschen gebracht wurde. Sie war am Schwungrad der Maschine befestigt, so daß die Dauer ihres Aufleuchtens, als Kurbelweg gemessen, verhältnismäßig einfach bestimmt werden konnte.

Man wollte nun 1936 so wie für die Prüfung der Ottokraftstoffe auch für die Prüfung von Dieselkraftstoffen Richtlinien festlegen, doch waren die diesbezüglichen Arbeiten noch zu wenig vorgeschritten. Insbesondere waren die Ergebnisse der bis dahin durchgeführten Untersuchungen noch nicht so befriedigend, daß ein bestimmter Motor und ein bestimmtes Verfahren endgültig vorgeschlagen werden konnten. Auch war noch die Frage zu entscheiden, ob der Zündverzug gemessen werden soll, wie dies bei dem vorbeschriebenen Prüfmotor der I.G. der Fall war oder ob das im nächsten Abschnitt zu beschreibende, vom Heereswaffenamt in den Vordergrund gestellte Anlaßverfahren geeigneter ist.

Im Laufe der weiteren Entwicklung nach 1936 wurde das Verfahren der I.G. dadurch verbessert, daß nicht nur der Zündverzug mit der Glimmlampe, sondern der gesamte Druckverlauf mit Hilfe eines Quarzdruckindikators ermittelt wird. Dieser überträgt seine Meßwerte auf den Leuchtschirm einer Braun'schen Röhre, wodurch man genaueren Aufschluß über den Verbrennungsablauf erhält, als dies bei der Messung des Zündverzuges mit der Glimmlampe der Fall ist. Außer der I.G. hatte das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart (FKFS) Arbeiten in gleicher Richtung aufgenommen, nur wurde dort der Zündverzug bei gleichbleibendem Verdichtungsdruck ermittelt. Als Meßgeräte werden zwei Quarzdruckmesser verwendet, die Einspritzbeginn und Zündung je für sich anzeigen und eine, ähnlich wie bei dem ursprünglichen I.G.-Verfahren auf dem Schwungrad angebrachte Glimmlampe schalten [51]. Neuerdings wird in diesem Institut zum Anzeigen des Zündbeginnes eine Photozelle verwendet. Schließlich seien noch die im Institut für Chemische Technologie der Technischen Hochschule in München, sowie die von der Erprobungsstelle der

Deutschen Luftwaffe unternommenen Versuche erwähnt. Diese verschiedenen Arbeiten haben die Grundlage für die angestrebte Vereinheitlichung des Prüfverfahrens geschaffen. Es wurden deshalb Vergleichsversuche mit 14 Kraftstoffen durchgeführt, deren Ergebnisse in Zahlentafel 7 zusammengestellt sind. Sie standen bei der erwähnten Tagung des Sonderausschusses im April 1942 zur Erörterung [52].

Der bei diesen Versuchen mitverwendete HWA-Motor ist der vom Heereswaffenamt vorzugsweise für sein Anlaßverfahren benutzte Motor der Klöckner-Humboldt-Deutz AG, der mit 960 U/min läuft. Er ist für die Messung des Einspritzbeginns und des durch die Zündung verursachten Druckanstieges mit einem sog. Trägheitsindikator ausgestattet, wie er von H. H. Neumann für die Arbeiten der Rhenania-Ossag entwickelt wurde. Bei ihm wird bei Überschreiten eines durch eine Feder einstellbaren Beschleunigungswertes ein Kontakt geöffnet und damit der Zeitpunkt der Zündung ermittelt. Da durch den auf die Zeit bezogenen Druckanstieg d^2p/dt^2 im Zylinder unmittelbar nach der Zündung eine Beschleunigung der Meßmembrane hervorgerufen wird, die immer ein Vielfaches der größten, durch die Verdichtung erzeugten Beschleunigung beträgt, ist eine Fehlanzeige kaum möglich. Die Beschleunigung der Düsennadel bewegt sich beim Öffnen in ähnlichen Größenordnungen wie die der Membrane bei der Zündung. Der Trägheitsindikator wird deshalb dazu verwendet, sowohl den Einspritzbeginn zu messen, indem er auf die Düsennadel aufgesetzt wird, als auch den Druckanstieg im Zylinder, indem er den Impuls von der Durchbiegungsbeschleunigung einer in die Wand des Verbrennungsraumes eingebauten Membrane erhält. Durch eine geeignete Schaltung wird eine mit der Kurbelwelle umlaufende Neonröhre zum Aufleuchten gebracht, bei der nach Angabe von Neumann die Lage der Kurbelwellenachse mit einer Genauigkeit von einem $1/10^0$ Kurbelwinkel ablesbar sein soll. Bei dem von der Luftwaffe ebenfalls zur Prüfung verwendeten CFR-Motor handelt es sich um den bereits im Abschnitt II 1 erwähnten Motor des Cooperative Fuel Research

Committee, der mit einem für die Untersuchung von Dieselkraftstoffen geeigneten Dieselzylinderkopf mit Wirbelkammer ausgestattet ist.

Dem Bericht von O. Kessler kann zusammenfassend folgendes Ergebnis entnommen werden: Wenn man berücksichtigt, daß zwischen den Bauarten der verwendeten Motoren, den Prüfbedingungen und den zur Messung des Zündverzuges verwendeten Geräten beträchtliche Unterschiede bestanden, so kann die Übereinstimmung zwischen den ermittelten Zetanzahlen als recht befriedigend angesehen werden. Allerdings wurden dabei die Ergebnisse der bei der DVL mit einem Motor Bauart Slowak durchgeführten Versuche unberücksichtigt gelassen, weil sie durchwegs aus dem Rahmen der übrigen Ergebnisse herausfielen. Als Ursache für die festgestellten Abweichungen wird der für diese Versuche verwendete Höchstdruckmesser angesehen, mit dem im Gegensatz zu den anderen Prüfstellen nicht der Zündverzug selbst ermittelt wurde. [10])

Bei einem der geprüften Kraftstoffe streuten die Meßergebnisse am meisten; die größte Abweichung von dem aus den Meßergebnissen aller sieben Prüfmotoren festgestellten Mittelwert beträgt nach oben 4,5 und nach unten 5,0 Zetanzahleinheiten. Hingegen betrug der Mittelwert sämtlicher höchsten Abweichungen bei allen vierzehn Kraftstoffen + 2,4 bzw. - 3,2 Zetanzahl-Einheiten.

Wie aus der Zahlentafel 7 zu ersehen ist, lieferte der FKFS-Motor bei befriedigender Prüfgenauigkeit die mit den Mittelwerten am besten übereinstimmenden Ergebnisse. Da er aber den Zündbeginn mit Hilfe einer Photozelle feststellt, können durch Verschmutzen des erforderlichen Quarzfensters Fehler entstehen. Mit Hilfe des I.G.-Prüfdieselmotors wurden bei guter Prüfgenauigkeit etwas unter den Mittelwerten liegende Zetanzahlen festgestellt. Das Meßgerät mit Braun'scher Röhre

---

[10]) Im Gegensatz zu diesem Urteil bedeutet das in Abschnitt II 1 beschriebene Gerät der DVL zur Bestimmung des Klopfbeginns durch Ermittlung der zweiten Ableitung der Druckverlaufskurve nach der Zeit einen wesentlichen Fortschritt für die Prüfung von Ottokraftstoffen.

erscheint für eingehende Untersuchungen der Verbrennungsvorgänge sehr geeignet, jedoch nicht für Prüfstellen, an denen mit wenig geschulter Bedienungsmannschaft nur die Zetanzahl ermittelt werden soll. Der HWA-Motor ergab bei ebenfalls guter Prüfgenauigkeit Werte, die etwas über den festgestellten Mittelwerten lagen. Der bei dieser Maschine ermittelte Trägheitsanzeiger nach Neumann ist verhältnismäßig billig, betriebssicher und leicht zu warten.

Da für die Vergleichsversuche drei CFR-Motoren verwendet wurden, war es möglich, aus den Messungen mit diesen Maschinen Mittelwerte zu bilden. Diese stimmten mit dem Gesamtmittelwert sehr gut überein. Doch ist die Streuung zwischen den einzelnen Meßwerten nicht unbeträchtlich; die Wiederholbarkeit der Versuche läßt zu wünschen übrig. Bei dem bereits erwähnten Kraftstoff, für den die am meisten voneinander abweichenden Zetanzahlen festgestellt wurden, ergab der eine der CFR-Motoren die genannte große Abweichung von 5,0 Zetanzahleinheiten. Die Streuung beträgt gegenüber dem Mittelwert von 46,7 aus den drei CFR-Messungen beinahe + 10 % und mehr als - 7 %. Auf das zu den Vergleichsversuchen mit herangezogene Anlaßverfahren wird im nächsten Absatz noch eingegangen.

Auf Grund der geschilderten Ergebnisse wurde daher vom "Sonderausschuß zur Normung der motorischen Prüfung von Dieselkraftstoffen" folgendes beschlossen:

1. Genormt wird das Zündverzugsverfahren als Unterlage zur Bestimmung der Zetanzahl.
2. Bei der Prüfung ist der Zündverzug konstant zu halten;
3. hierfür sind der HWA-Motor und der I.G.-Prüfmotor zu verwenden;
4. der Zündverzug ist entweder durch Drosselung oder Verdichtungsänderung konstant zu halten.
5. Als Meßgeräte können verwendet werden: Der Trägheitsgeber nach Neumann (Rhenania-Ossag), der Piezo-Quarzindikator oder der Photozellen-Indikator des Forschungsinstitutes für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmo-

toren, Stuttgart.

6. Für den Zetanzahlbereich von 30 bis 70 kann auch die Aussetzer-Methode im HWA-Motor angewendet werden.

Die in Zetanzahlen ausgedrückte Zündwilligkeit kann das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb ebenso wenig ausreichend kennzeichnen wie die durch die Oktanzahl allein ausgedrückte Klopffestigkeit. So wie bei der Bewertung von Ottokraftstoffen hat es auch hier nicht an Versuchen gefehlt, Eigenschaften der Kraftstoffe zu ermitteln, die Rückschlüsse auf das Verhalten im Fahrbetrieb gestatten. Hierzu gehört unter anderem das Startvermögen eines Motors aus dem kalten Zustand, auf das die Zündwilligkeit des verwendeten Kraftstoffes erheblichen Einfluß hat.

d. Das Anlaßverfahren des ehemaligen Heereswaffenamtes

Wegen der besonderen Bedeutung, die das Startvermögen für die motorisierten Truppen hat, wurde vom Heereswaffenamt (HWA) der Deutschen Wehrmacht ein Prüfverfahren bevorzugt, bei dem das Anspringen eines Motors festgelegter Bauart untersucht wurde. Selbstverständlich ist es möglich, das auf diese Weise ermittelte Startvermögen eines Kraftstoffes bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen in Vergleich zu setzen mit einem aus Zetan und α-Methyl-Naphthalin hergestellten Kraftstoff, wie dies bei der Zündverzugsmessung üblich ist. Man muß sich aber davor hüten, zu erwarten, daß die auf solche Weise ermittelten "Zetanzahlen" mit den im Zündverzugsverfahren festgestellten durchwegs übereinstimmen. Es trifft dies, wie die im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Vergleichsversuche ergeben haben, nur für Kraftstoffe mit einer Zetanzahl von 35 bis etwa 50 zu. Dies wird deutlich, wenn man die Mittelwerte der beiden Zahlentafeln gegenüberstellt, die O. Kessler [52] veröffentlicht hat. Danach erscheint der Punkt 6 des Beschlusses des Sonderausschusses, wonach das Anlaßverfahren bis zu Zetanzahlen von 70

für anwendbar erklärt wird, nicht ohne weiteres verständlich.

Trotzdem soll die Berechtigung eines solchen Prüfverfahrens nicht verkannt werden. Man muß nur berücksichtigen, daß die Prüfbedingungen vollkommen von denen des Dauerbetriebes abweichen und sich daher Einflüsse geltend machen, die sich bei einem im Beharrungszustand befindlichen Motor nicht auswirken.

Bei dem Prüfverfahren des Heereswaffenamtes, über das P. Weber berichtete [53], wird bei gleichbleibender Betriebstemperatur die Ansaugluft solange gedrosselt, bis ein Zustand erreicht ist, in dem der eingespritzte Kraftstoff beim Anlassen gerade noch zündet. Der im Ansaugrohr eingestellte Unterdruck dient dabei als Maßstab für die Zündwilligkeit, nachdem die Abhängigkeit dieses Wertes von Standardkraftstoffen bekannter Zusammensetzung ermittelt wurde. Auch in den Vereinigten Staaten von Amerika und in Holland war ursprünglich das Anlaßverfahren zur Prüfung von Dieselkraftstoffen gebräuchlich, wurde jedoch offenbar aus den gleichen Gründen, die in Deutschland zu einer Bevorzugung des Zündverzugsverfahrens führten, aufgegeben.

Im Zusammenhang mag hier noch kurz auf Untersuchungen hingewiesen werden, die im Auftrag des Heereswaffenamtes von der Versuchsanstalt für Fahrzeugmotoren und Kraftfahrzeuge an der Technischen Hochschule Berlin durchgeführt wurden [54]. Sie hatten den Zweck festzustellen, welche Beziehungen zwischen der im HWA-Prüfmotor nach dem Anlaßverfahren gemessenen "Zetanzahl" und dem Startvermögen eines Dieselkraftstoffes bei tiefen Temperaturen bestehen. Zur Prüfung wurden drei Fahrzeugmotoren herangezogen, die in einer Kältekammer liefen.

In zwei zeitlich auseinander liegenden Versuchsreihen wurden für vierzehn verschiedene Kraftstoffe die in Arbeitsspielen ausgedrückten Anlaßzeiten bis zur ersten Zündung bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Die gemessenen Werte wiesen erhebliche Streuungen auf, sowohl innerhalb derselben Versuchsreihe als auch zwischen den bei gleichen Versuchsbedingun-

gen, jedoch in größeren zeitlichen Abständen voneinander gemessenen Werten. Die von Weber veröffentlichten hyperbelähnlichen Kurven, welche den Zusammenhang zwischen den Arbeitsspielen bis zur ersten Zündung und der Außentemperatur zeigen sollen, erscheinen bei der großen Streuung nicht frei von einer gewissen Willkür. Der einzige erkennbare Unterschied zwischen den einzelnen Kurven liegt, wie nicht anders zu erwarten, in der Außentemperatur, bei der nach einer gleichen Zahl von Anlaßspielen Zündung eintritt. Der bei allem untersuchten Kraftstoffen beinahe kongruente, asymptotische Verlauf läßt die ebenfalls nicht überraschende Tatsache erkennen, daß mit abnehmender "Zetanzahl" unterhalb einer immer höher liegenden Außentemperatur mit einem Anspringen des Motors nicht gerechnet werden kann. Die aus dem Verlauf der Kurven abgeleiteten Formeln sind wegen der vorerwähnten Willkür bei der Festlegung dieser Kurven von fragwürdigem Wert. Obwohl somit aus diesen Versuchen offenbar keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können, sollten sie nicht unerwähnt bleiben. Denn es ist keineswegs ausgeschlossen, daß sich die Ursachen für die großen Streuungen erkennen und beseitigen lassen. Dann wird auch darauf verzichtet werden können, erst durch Korrekturen, die nicht recht überzeugen, eine einheitliche Grundlage für die Auswertung der Versuchsergebnisse zu schaffen. Jedenfalls werden auch beim Dieselmotor noch umfangreiche Forschungsarbeiten nötig sein, um zu einer Bewertung der Kraftstoffe zu kommen, die praktischen Bedürfnissen weitergehend Rechnung trägt, als dies durch den in Zetanzahlen gemessenen Zündverzug möglich ist.

2. Versuche der rechnerischen Ermittlung von Klopfwert und Zündwilligkeit aus chemischen und physikalischen Kenngrößen

Die Meßverfahren zur Ermittlung der Klopffestigkeit und Zündwilligkeit in Prüfmotoren erscheinen im Vergleich zu den für die Ermittlung anderer Kraftstoffeigenschaften angewendeten sehr umständlich; sie erfordern einen gut eingerichteten Prüfstand mit einem nicht unbeträchtlichen Aufwand an Geräten. Daher ist es verständlich, daß verschiedentlich Versuche unternommen wurden, die Verbrennungseigenschaften von Kraftstoffen durch Verfahren zu bestimmen, die den im chemischen Laboratorium üblichen angepaßt sind. Das hat allerdings zur Voraussetzung, daß es möglich ist, die in Kraftstoffen enthaltenen Kohlenwasserstoffe, wenn schon nicht einzeln, so doch wenigstens in Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zu erfassen. Denn wenn man auf Grund des Herkommens und der Verarbeitungsart mit chemisch durchwegs ähnlichen Kraftstoffen rechnen kann, werden sich Berechnungsarten auf Grund chemisch-physikalischer Eigenschaften voraussichtlich eher bewähren, als dann, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind.

Nun hat sich im Zuge der Besprechung der Einzelheiten des Klopfvorganges, des Verhaltens der chemischen Gruppen der Kohlenwasserstoffe und der motorischen Prüfverfahren gezeigt, daß beim Dieselmotor die Bauart und die Betriebsbedingungen auf das Endergebnis, soweit es nur zu Vergleichen herangezogen wird, wesentlich geringeren Einfluß haben als beim Ottomotor. Die Beschaffenheit des Kraftstoffes kommt also beim Betrieb des Dieselmotors offenbar reiner zur Geltung als bei dem des Ottomotors. Tatsächlich ist es auch zuerst bei Dieselkraftstoffen gelungen, brauchbare Bestimmungsverfahren auf Grund physikalischer Kenngrößen vorzuschlagen, die sich in der Praxis durchgesetzt haben.

Bei dieser Betrachtung darf folgender Unterschied nicht außer Acht gelassen werden. Für den Ottomotor kommen im allgemeinen nur Kraftstoffe mit wesentlich niedrigerem Siedebe-

reich in Frage als für den Dieselmotor. Die Zahl der verschiedenen Kohlenwasserstoffe, die in Ottokraftstoffen vorkommen können, läßt sich daher noch angeben, wenn sie auch sehr beträchtlich ist. Gibt es doch schon, wie aus Abb. 11 zu ersehen ist, bei einer Kohlenstoffatomzahl von 10 - die Siedepunkte liegen dann bei etwa 160° C - 75 mögliche isomere Paraffine (Dekane); diese können in Ottokraftstoffen immerhin noch vorkommen. Die Zahl der in Frage kommenden Olefine beträgt wegen der durch die Zahl und Stellung der Doppelbindungen möglichen Variationen ein Vielfaches. Dazu kommt noch die ebenfalls nicht unbeträchtliche Anzahl von Aromaten und Naphthenen. Bei Dieselkraftstoffen, die im allgemeinen erheblich höhere Molekulargewichte haben, wird aber die Zahl der chemischen Einzelstoffe, die darin enthalten sein können, praktisch unübersehbar. Man wird demnach bei Dieselkraftstoffen wohl nur dann praktischen Erfolg haben, wenn die an der Bildung von Kraftstoffen beteiligten chemischen Einzelverbindungen mit gleichem oder ähnlichem Verhalten bei der Verbrennung gruppenweise zusammengefaßt werden; oder man versucht, aus möglichst wenigen Werten die Eigenschaften vorauszubestimmen. Dabei bleibt im allgemeinen noch zu klären, welche Mischungsregeln im Falle der gruppenweisen Trennung gelten.

Ob es darüber hinaus einmal gelingen wird, die Eigenschaften von Ottokraftstoffen durch Trennung oder Analyse und anschließende Berechnung aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten zu bestimmen, mag dahingestellt bleiben. Die geringen Abstände zwischen den Siedepunkten der im Frage kommenden einzelnen Verbindungen sind auf alle Fälle als sehr erschwerend für Arbeiten in dieser Richtung anzusehen.

a. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen

Einer der ältesten Versuche, die Zündwilligkeit von Diesel-

kraftstoffen zu berechnen, geht von dem Verhältnis des Wasserstoffgehaltes zum Kohlenstoff aus. Es ist tatsächlich geeignet, bei Kraftstoffen ähnlicher Herkunft und Verarbeitungsart Anhaltspunkte für die Zündwilligkeit zu geben, weil sie der Reihe nach von den Paraffinen und Olefinen über die Naphthene zu den Aromaten abnimmt. Es gestattet aber keine mit den heutigen Klopfwertbestimmungen vergleichbaren quantitativen Auswertungen. Ähnliches gilt von anderen einzelnen Kenngrößen wie Heizwert, spezifischer Refraktion, Wichte usw.

Heinze und Marder, die eingehende diesbezügliche Untersuchungen angestellt haben [55], schlugen deshalb als geeignetere Kenngröße zunächst den spezifischen Parachor $p = \frac{\sigma}{d^{1/4}}$ vor, wobei σ die Oberflächenspannung und d die Wichte bedeuten.[11]) Es hat sich jedoch herausgestellt, daß es mit Rücksicht auf die immerhin vorhandenen Abweichungen von motorisch festgestellten Werten genügt, die Zetanzahl aus der Dichte und einer Siedekennzahl zu errechnen.[12])

Marder hat einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Dichte und der Zetenzahl, und zwar für das ältere CFR-Verfahren mit Drosselung, für eine Siedekennzahl von 300°C ermittelt;

---

11) Dabei ist zu beachten, daß in der Physik und physikalischen Chemie die Dichte wohl die Dimension g/cm^3 hat; in Übereinstimmung aber mit dem cm-g-s-System ist das Gramm die Masseneinheit und die im technischen Maßsystem übliche Wichte (früher spezifisches Gewicht genannt) ist daher gleich $\gamma = g \cdot d$ mit g als Erdbeschleunigung. Der Parachor wurde seinerzeit von S. Sugden: Z. chem. Soc. Bd. 125 (1924) S. 1177, deshalb als physikalische Kenngröße an Stelle der Oberflächenspannung empfohlen, weil er sich gegenüber dieser mit der Temperatur nur wenig ändert, bei nicht assoziierten Flüssigkeiten sogar konstant ist. Er kann bei Berücksichtigung des Bindungsinkrements für einfache Atomverbindungen additiv aus den Atomparachoren errechnet werden.

12) Die Siedekennzahl wurde von Wa. Ostwald: Petroleum, Bd. 22 (1926) S. 678, Bd. 23 (1927) S. 476, vorgeschlagen und wird errechnet, indem man die Siedetemperaturen addiert, bei denen 5; 15; 25; usw., um je 10 steigend, bis 95 Raumprozente übergegangen sind, und die so ermittelte Summe durch 10 dividiert.

die dieser Siedekennzahl entsprechende Zetenzahl kann daher unmittelbar von einer dementsprechend geeichten Aräometerspindel abgelesen werden. Die tatsächlich zu erwartende Zetenzahl wird dann dadurch ermittelt, daß man von dem mit der Spindel gemessenen Wert die mit einem Berichtigungsfaktor multiplizierte Differenz zwischen 300° C und der tatsächlichen Siedekennzahl abzieht. Der Berichtigungsfaktor hat bei der Siedekennzahl 200° C den Wert 0,40 und ändert sich für je 10 Kennzahlen-Einheiten im entgegengesetzten Sinne um 0,01; er hat demnach für eine Siedekennzahl von 350° C den Wert 0,25.

Durch die Berücksichtigung der Siedekennzahl nach den Vorschlägen von Heinze und Marder wird erreicht, daß bei der rechnerischen Ermittlung der Zündwilligkeit die Molekülgröße miterfaßt wird. Sie ist, wie früher dargelegt wurde, von Einfluß auf das Zündverhalten der Kraftstoffe. Die Übereinstimmung der nach diesem Verfahren im Laboratorium vorausbestimmten Zetenzahlen mit dem im Prüfmotor gemessenen ist durchaus befriedigend, zumal, wenn man die Streuung bei der motorischen Prüfung von Dieselkraftstoffen bedenkt. Eine Umrechnung auf die heute übliche Bewertung in Zetanzahlen im Verhältnis 76 : 100 ist ohne weiteres möglich. Außerdem hat Vorberg in einer Arbeit [55] jüngeren Datums die Beziehung zwischen der Wichte bei 15° C und der im I.G.-Prüfdiesel nach dem Zündverzugs-Verfahren ermittelten Zetanzahl neu aufgestellt und als Zahlentafel veröffentlicht. Die Bezugnahme auf eine Siedekennzahl ist beibehalten; die Berichtigungswerte für andere Siedekennzahlen sind ebenfalls in einer Zahlentafel zusammengefaßt. Die Berechnung ist demnach mit dem Aräometer leicht möglich. Sie versagt nur bei Misch-Dieselkraftstoffen und bei solchen, welche Zündbeschleuniger enthalten. Die letzten kommen jedoch, wie im Abschnitt I 5 auseinandergesetzt wurde, praktisch kaum vor. Schließlich sei noch auf eine von R. Tannenberger [56] veröffentlichte Fluchtlinientafel verwiesen, die die Zetenzahl abzulesen gestattet, wenn Dichte und Siedeverhalten gegeben sind.

Gehen Heinze und Marder bei dem vorgeschlagenen Verfahren

von dem Kraftstoff als Ganzem aus, wobei die chemische Konstitution nur mittelbar durch die Dichte eingeführt wird, so ist anderen Verfahren eigentümlich, daß versucht wird, Aufschluß darüber zu erhalten, welche Kohlenwasserstoffgruppen und in welcher Menge sie sich an der Zusammensetzung eines Kraftstoffes beteiligen. Von diesen mehr im Ausland gebräuchlichen Verfahren sei besonders jenes erwähnt, das sich an die bei der Untersuchung von Schmierstoffen gern angewandte Ringanalyse von Waterman anschließt [57]. Bei diesem Verfahren wird versucht, aus der Dichte, der Refraktion [58], dem Anilinpunkt [57, S. 113] und dem mittleren Molekulargewicht das Verhältnis von Aromaten, Naphthenen und Paraffinen zu errechnen, das auch für das Verhalten von Schmierstoffen wichtig ist. Es wird jedoch in Deutschland kaum angewandt.

b. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Klopffestigkeit von Ottokraftstoffen

Zunächst bieten die gleichen Verfahren, die bei der Berechnung der Zündwilligkeit erwähnt wurden, die Möglichkeit, auch die Klopffestigkeit vorauszubestimmen, denn das gegensätzliche Verhalten der Kraftstoffe in dieser Hinsicht ist ausnahmslos festgestellt. So fand man, daß die Oktanzahl von Destillatbenzinen bei zunehmender Wichte und fallender Siedekennzahl ansteigt. Auch vom Parachor, vom Brechungsquotienten, von der Refraktion und ähnlichen Kenngrößen lassen sich Abhängigkeiten der Klopffestigkeit ermitteln, doch sind Berechnungsverfahren, die solche Abhängigkeit ausnutzen, wegen der damit verknüpften Unsicherheiten kaum gebräuchlich. Sie gestatten auch nur eine einigermaßen wahrscheinliche Voraussage, wenn man die Art der Benzine kennt, denn bei Ottokraftstoffen kommen wegen der kleinen Molekülgröße die Feinheiten der Unterschiede im Molekülbau stärker zur Geltung als bei Dieselkraftstoffen.

Dazu kommt, daß die in Oktanzahlen ausgedrückte Klopffestigkeit gegenüber der Zündwilligkeit in noch stärkerem Maße als konventionelle Größe angesehen werden muß; ihr Wert wird von sehr vielen willkürlich festgelegten Kenngrößen des Betriebes der Prüfmotoren beeinflußt. Es ist daher nicht zu erwarten, daß sich die Oktanzahl ohne weiteres aus chemisch-physikalischen Eigenschaften nach einfachen Gesetzen errechnen läßt. Dies zeigt sich z.B. schon daran, daß ein additives Gesetz im allgemeinen nicht gilt. Nichtsdestoweniger wurden von Heinze und Marder [59] Versuche in dieser Richtung unternommen. Sie lehnen sich an ihr bei Dieselkraftstoffen bewährtes Berechnungsverfahren mit Hilfe der Dichte und Siedekennzahl an. In der Praxis hat diese Art der Bestimmung der Klopffestigkeit jedoch nicht den gleichen Anklang gefunden. Inzwischen hat R. B. Cox [60] feststellen können, daß bei der Ermittlung der Klopffestigkeit statt der Siedekennzahl besser der 10 %-Punkt und der 90 %-Punkt der ASTM-Destillation [61] benutzt wird. Cox hat umfangreiche Zahlentafeln mit Faktoren veröffentlicht, die zur Berechnung der Oktanzahl dienen. Auf dieser Grundlage haben Tannenberger und Seifert eine Fluchtlinientafel entworfen, die in der in Anm. [60] erwähnten Arbeit wiedergegeben ist.

Der gleiche Weg, wie er mit Hilfe der Ringanalyse bei Schmier- und Dieselkraftstoffen eingeschlagen werden kann, hat bei Ottokraftstoffen noch zu keinem einigermaßen brauchbaren Ergebnis geführt. Die verschiedenen, von den Chemikern mitunter angewandten gruppenanalytischen Verfahren, um den Gehalt eines Benzins an Olefinen, Naphthenen und Aromaten, den Gehalt an Paraffinen somit als Rest zu bestimmen, sind keineswegs verläßlich und können zu erheblichen Trugschlüssen führen [61].

Ein von den bisher beschriebenen Grundsätzen abweichendes Verfahren, den Gehalt eines Kohlenwasserstoffgemisches an Aromaten zu bestimmen, wurde von F. Josten angegeben [62]. Er benutzt die Tatsache, daß sich ringförmige Kohlenwasserstoffe durch deutlich erkennbaren Einfluß auf die Absorption der ultravioletten Strahlung im Bereich zwischen 2300 und 3500 Å be-

merkbar machen. Es mag dies als einer der vielen Versuche erwähnt werden, die Hilfsmittel der physikalischen Chemie zur Lösung der hier vorliegenden Aufgaben heranzuziehen. Wegen weiterer solcher Möglichkeiten sei auf zwei Arbeiten von A. Dadieu und auf die Monographie von R. Kremann verwiesen [63], in denen diese neuzeitliche Forschungsrichtung allgemein dargestellt ist. Dadieu befaßt sich dabei ausschließlich mit den hier allein in Frage kommenden organischen Verbindungen.

3. Von den üblichen Wegen abweichende Forschungsrichtungen

Bei der Vielgestaltigkeit der im Zusammenhang mit der Erforschung der Klopffestigkeit und Zündwilligkeit gestellten Aufgaben ist es nicht verwunderlich, daß von einzelnen Forschern Wege eingeschlagen werden, die von den üblichen abweichen, sofern man unter den letzten die motorischen Prüfverfahren einerseits und die Berechnung aus physikalisch-chemischen Kenngrößen andererseits versteht. Es wären hier zunächst einmal die Untersuchungen in Bomben zu nennen. Eine von diesen Arbeiten, nämlich die von A. Köchlin [7], wurde bereits im Abschnitt I 2 a näher beschrieben, auch wurden dort die Widersprüche, die sich z.T. im Gegensatz zu den Erfahrungen des Motorbetriebes ergaben, erwähnt. Eine wertvolle Unterstützung der diesbezüglichen Forschungsarbeiten ist, soweit es sich um Zündverzugsmessungen handelt, in letzter Zeit in den Arbeiten von K. Stallechner zu sehen, der sich die Aufgabe stellte, die Brauchbarkeit von Photozellen zur Ermittlung des Zündverzuges und zur Untersuchung von Verbrennungsvorgängen zu prüfen [64]. In der gleichen Richtung liegt eine Arbeit von H. Graff [65], der ein ähnliches Verfahren zur Bestimmung des Verlaufes der Gastemperaturen in Ottomotoren verwendet.

Durch Ausnahme von Strahlungsdiagrammen über Verstärker ist es möglich, die Vorgänge bei der Verbrennung vollkommen trägheitslos zu erfassen. Allerdings liegen noch nicht so viele

Versuchsergebnisse vor, daß eine umfassende Verwertung für eine größere Zahl von Kraftstoffen möglich wäre. Gegenüber der beim Prüf-Diesel des Forschungsinstitutes für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart üblichen Verwendung einer Photozelle zur Anzeige des Zündbeginns - (vgl. Abschnitt II 1 c) - stellen die zuletzt genannten Verfahren einen Fortschritt dar, weil hier nicht nur der Entzündungszeitpunkt, sondern der Verlauf der Strahlung aufgezeichnet und durch Verwendung von Filtern die Intensität in verschiedenen Wellenbereichen bestimmt werden kann. Hieraus können Schlüsse gezogen werden, die an die umfassenden Untersuchungen anschließen, die hauptsächlich an Ottomotoren durchgeführt und in Abschnitt I 2 a und b erwähnt wurden.

Neben den Verbrennungsversuchen in Bomben sind auch alle Arbeiten wichtig, welche die Verbrennung von gas- oder dampfförmigen Kohlenwasserstoffen in strömendem Zustand untersuchen, weil sie geeignet sind, Aufschluß über das verschiedenartige Verhalten dieser Verbindungen zu geben. Die Zahl der diesbezüglichen Arbeiten ist nicht gering. Die dabei zu lösenden Aufgaben sind nicht nur für die Technik des Verbrennungsmotors wichtig, sondern haben allgemeine Bedeutung; ihre Bearbeitung wurde schon in Angriff genommen, als Klopffestigkeit und Zündwilligkeit noch nicht so sehr im Mittelpunkt des Interesses standen wie heute. Eine gute Übersicht über die bis 1939 vorliegenden Ergebnisse ist in dem wiederholt genannten Buch von W. Jost [6] zu finden. Daß die Untersuchung von stetig brennenden Gasflammen für die Erforschung der motorischen Verbrennung nicht ohne Erkenntniswert ist, mag an Hand von Abb. 31 gezeigt werden. Es stellt den Sauerstoffverbrauch je Mol Kohlenwasserstoff abhängig von der Temperatur für die Oxydation isomerer Oktane mit Luft im stöchiometrischer Mischung nach G. Edgar und H. A. Beatty [66] dar. Aus dem Verlauf der Kurven ist das auffällige Verhalten von 2,2,4-Trimethylpentan zu erkennen, so daß die Klopffestigkeit dieses Iso-Oktans als Folge seiner besonderen Verbrennungseigenschaften betrachtet werden

kann. Diese machen sich auch in anderen Erscheinungen bemerkbar, weshalb die Erforschung solcher Zusammenhänge auch für die Motortechnik als Erfolg versprechende Aufgabe anzusehen ist.

Weiterhin sind noch die Versuche zu nennen, welche zwar einen Motor verwenden, ihn jedoch nicht als solchen betreiben, sondern dadurch nur die äußeren Bedingungen für einen möglichst ähnlichen Reaktionsverlauf schaffen wollen. So haben E. Schmidt und E. Mühlner einen flüssigkeitsgekühlten Einliter-Viertaktmotor, der von einer elektrischen Pendelmaschine angetrieben wurde, dazu benutzt, um die Vorreaktionen zu studieren [67]. Sie hielten durch Umwälzung von Äthylenglykol die Temperatur im Zylindermantel auf gleichbleibend 140° C, wärmten das Kraftstoff-Luft-Gemisch auf dieselbe Temperatur vor und bestimmten bei verschiedenen Luftüberschußzahlen den durch die Vorreaktionen verursachten Temperaturanstieg, oder den Unterschied, der sich gegenüber den Verhältnissen ergab, wenn nur reine Luft vom Motor angesaugt, komprimiert und ausgeschoben wurde. Neben der Luftüberschußzahl wurde auch die Drehzahl und das Verdichtungsverhältnis geändert, desgleichen wurde die oben mit 140° C angegebene Temperatur geändert. Die an 13 Kraftstoffen durchgeführten Versuche ergeben einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den festgestellten Temperaturdifferenzen und der Klopffestigkeit. Je geringer diese ist, desto größer sind die Temperaturunterschiede. Bei Alkohol und Benzol konnten in Übereinstimmung mit anderen, bereits erwähnten Versuchen keine Temperaturunterschiede, also keine Vorreaktionen festgestellt werden. Gelegentlich dieser Versuche wurden auch die in der Arbeit [14] genannten chemisch-analytischen Untersuchungen durchgeführt, die jedoch ein abschließendes Urteil noch nicht gestatten.

Von der Erkenntnis ausgehend, daß sich zündträge Kraftstoffe, sofern sie im Ottomotor verwendet werden können, als klopffest erwiesen und bei zündwilligen Kraftstoffen das Gegenteil der Fall ist, haben es einige Forscher unternommen, den Zündverzug von Ottokraftstoffen in Bomben oder ähnlichen Ge-

fäßen zu ermitteln. Hierzu gehören die schon Anfang der 20er Jahre durchgeführten Untersuchungen von Tizard und Pye. Diese Forschungsrichtung wurde von Jost und Teichmann [68], in neuerer Zeit von F. A. F. Schmidt sowie von M. Scheuermeyer und H. Steigerwald wieder aufgegriffen [69], wobei das zu untersuchende Kraftstoff-Dampf-Luft-Gemisch durch einen Kolben adiabatisch verdichtet wird.

Die bei diesen Untersuchungen erzielten Ergebnisse haben noch zu keiner einheitlichen Auffassung geführt. Eine Erklärung für die festgestellten Unterschiede kann dadurch gegeben werden, daß bei geringer Verdichtungsgeschwindigkeit in den zu solchen Versuchen benützten Apparaturen und bei dem dadurch verursachten hohen Wärmeübergang die scheinbare Aktivierungsenergie wesentlich höher ist, zumindest im Bereiche großer Zündverzüge. Es müssen daher offenbar noch die Einzelheiten der Versuchsdurchführung näher festgelegt werden, um zu vergleichbaren Ergebnissen zu kommen.

Zum Schluß soll noch eine Arbeit besprochen werden, in der unter anderem auf Zusammenhänge hingewiesen wird, die bisher nur vereinzelt Beachtung fanden. G. Willfang und E. Willfang [70] weisen darin zunächst darauf hin, daß der Werkstoff, aus dem die Wände des Verbrennungsraumes bestehen, einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß haben kann. Dies ist wohl eine schon seit langem bekannte und im Zusammenhang mit der Erforschung von Verbrennungsvorgängen wiederholt besprochene Erscheinung. Denn an der Wand können die Kettenreaktionen leichter abgebrochen werden. Es trifft aber zu, daß bei der Bestimmung der Klopffestigkeit bisher im allgemeinen auf diesen Umstand noch nicht geachtet wurde. Weiterhin weisen G. und E. Willfang darauf hin, daß gewisse Unstimmigkeiten aufzuklären sind, die zwischen der guten Klopffestigkeit von Olefinen und der Tatsache bestehen, daß diese fast immer von Peroxyden begleitet werden; die Peroxyde werden aber doch ganz besonders für das Klopfen verantwortlich gemacht.

Bei der Kritik der Versuche, Klopffestigkeit und Zündwil-

ligkeit aus physikalisch-chemischen Kenngrößen zu errechnen, zu denen übrigens, soweit sie Paraffinkohlenwasserstoffe betreffen, noch eine in letzter Zeit erschienene Arbeit von A. W. Francis [71] gehört, machen die beiden Forscher darauf aufmerksam, daß bei der Mischung von Benzinen deutlich feststellbare Wärmetönungen zu beobachten sind. Auch deshalb macht also die Berechnung von Oktanzahlen aus laboratoriumsmäßig ermittelten Werten Schwierigkeiten, weil die Entropieänderungen nicht bekannt sind. Dies erklärt zwanglos die erwähnte Feststellung, daß sich das Berechnungsverfahren von Heinze und Marder bei Oktanzahlen nicht durchsetzen konnte; es kommen eben bei den niedrigmolekularen Verbindungen die Besonderheiten der chemischen Struktur stärker zur Geltung. Im übrigen ergibt sich für unverzweigte Paraffine und Olefine der in Abb. 32 dargestellte Verlauf für die Abhängigkeit der nach dem Motor-Verfahren ermittelten Oktanzahl von dem Molvolumen und der Entropie. Auf diesen Zusammenhang haben vor kurzem auch Egloff und Mitarbeiter aufmerksam gemacht [72].

Es zeigt sich, daß die dargestellten Kurven für die Paraffine den stärksten Abfall der Oktanzahl bei jenen Verbindungen aufweisen, welche am leichtesten dazu neigen, Ringe zu bilden. Es wurde in Abschnitt I 4 näher erläutert, daß dabei Ringe mit sechs und allenfalls fünf Kohlenstoffatomen besonders bevorzugt werden. Deshalb sollte das aus der organischen Chemie bekannte, diesbezügliche Reaktionsverhalten im Zusammenhang mit der Klopffestigkeit noch näher untersucht werden. Wegen der weiteren Ausführungen, die sich mit ähnlichen Zusammenhängen bei anderen Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe befassen und die daraus sich ergebenden Forschungsaufgaben unterstreichen, sei auf die angeführte Arbeit selbst verwiesen.

Sehr beachtlich ist jedenfalls die von den beiden Forschern getroffene Feststellung, daß nach allen vorliegenden Untersuchungsergebnissen offenbar eine Klopffestigkeit von 120 Oktanzahl-Einheiten nicht überschritten werden kann, wenn man vereinzelte Angaben, die dem zu widersprechen scheinen, auf

vermutliche Meßfehler zurückführt. Dies würde die am Schluß von Abschnitt I 4 b erwähnte Formel von W. Wilke rechtfertigen, nach der sich dieser Wert für die Klopffestigkeit bei einer Zündwilligkeit vom Werte 0 ergibt.

III. Schlußwort

Auf dem Gebiete der Erforschung des motorischen Verhaltens von Kraftstoffen sind im Verlauf der letzten Jahre durchaus beachtliche Fortschritte erzielt worden. Nichtsdestoweniger sind noch eine große Anzahl von Forschungsaufgaben zu lösen, deren Schwerpunkt sich jetzt, nachdem die Verfahren der motorischen Prüfung zu einem gewissen Abschluß gelangt sind, auf der theoretischen Durchdringung verschiebt. Dabei sind alle verfügbaren Hilfsmittel der Strukturchemie, Reaktionskinetik und Thermodynamik heranzuziehen.

- - - - -

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

IV. Schrifttum

zum Bericht Nr. 225, Them. Lohnziffer I D/2 c

"Klopffestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse und ungelöste Aufgaben der Forschung)

Verfasser: Ing. Dr. techn. Dr. jur. B. Riediger

[1] H. R. Ricardo: High-speed Combustion Engines, deutsche Übersetzung: Schnellaufende Verbrennungsmotoren, Berlin 1926, 2. Aufl., 1932, Springer-Verlag.

[2] C. R. Acad. Sci., Paris Bd. 197 (1933) Seite 393; Ann. Off. nat. Comb. liquides Bd. 9 (1934) S. 141 sowie Beitrag in: The Science of Petroleum, herausgegeben von E. Dunstan, A. W. Nash, B. T. Brooks and H. T. Tizard, London (Oxford) - New York-Toronto 1938, 4. Bd., S. 3054.

[3] J. Soc. automot. Engr. Bd. 30/31 (1932) S. 283; VDI-Forsch.-Hefte Nr. 366 und 372, VDI-Verlag, Berlin 1934; J. Inst. Petrol. Technol. Bd. 21 (1935), S. 40 sowie Beitrag in: The Science of Petroleum, vgl. Anm. 2, 4. Bd. S. 2994.

[4] Dieser Vorgang wurde wohl zuerst von Rassweiler, Withrow und deren Mitarbeitern mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen bei einer Bildfolge von 5000 je s im Zylinder einer Maschine sichtbar gemacht, in deren Zylinderkopf ein Quarzfenster eingebaut war. Vgl. hierzu C. L. Withrow und Th. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 23 (1931) S. 539, und G. M. Rassweiler und L. Withrow: Industr. Engng. Chem. Bd. 23 (1931) S. 769, Bd. 24 (1932) S. 528, Autom. Engr. Bd. 24 (1934) S. 281 und 385, J. Soc. autom. Engr. Bd. 39 (1936) S. 297, sowie: The Science of Petroleum, vgl. 2, 4. Bd., S. 2915.

[5] H. Nielsen: Der Einfluss der Eigenschwingungen brennender Gas-

gemische auf ihre Verbrennungsgeschwindigkeit, Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1933; Forsch. Ing.-Wes. Bd. 4 (1933) S. 300 bzw. Arch. techn. Messen Bd. 3 (Jan. 1936) S. 173; siehe auch A. v. Philippovich: Z. Elektrochem. Bd. 42 (1936) S. 472.

[6] W. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Berlin 1939, Springer-Verlag, S. 503.

[7] Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 1126.

[8] Th. A. Boyd: J. Soc. Automot. Engr. Bd. 45 (1939) S. 421.

[9] Über die ersten diesbezüglichen Arbeiten vgl. G. H. Withrow, W. G. Lovell und T. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 22 (1930) S. 945, A. Egerton, F. Smith und A. R. Ubbelohde: Phil. Trans. roy. Soc. London, Bd. 234 (1935) S. 433.

[10] G. M. Rassweiler und L. Withrow: Industr. Chem. Bd. 23 (1931) S. 769, Bd. 24 (1932), S. 528, Bd. 25 (1933) S. 923 und 1359, Bd. 26 (1936) S. 1256, Bd. 27 (1935) S. 872. Bezügl. weiterer Arbeiten in dieser Richtung siehe die zusammenfassende Darstellung in dem Buch von W. Jost 6.

[11] H. L. Callendar: Engineering Bd. 123 (1927) S. 147, 182 und 210; Ch. Moureu und Ch. Dufraisse: C. R. Acad. Sci., Paris, Bd. 184 (1927) S. 29 und Ch. Moureu, Ch. Dufraisse und R. Chaux: Ann. Off. nat. Comb. liquides, Bd. 2 (1927) S. 253.

[12] A. Egerton und A. R. Ubbelohde: Nature London Bd. 133 (1934) S. 179.

[13] Wegen weiterer Einzelheiten kann besonders auf L. A. Pelletier, G. G. van Hoogstraten, J. Waltenberg und P. L. Mooyman: Chim. et Ind., Bd. 20 (1939) S. 120, sowie auf eine zusammenfassende Darstellung von E. Lubbers in: The Science of Petroleum, vgl. Anm. 2, 4. Bd., S. 2950 verwiesen werden.

[14] G. Damköhler und F. Eggersglüss: Z. phys. Chem. (B) Bd. 51 (1942) S. 197; auf die Arbeit von Schmidt und Mühlner wird in Abschnitt II 3 noch eingegangen.

[15] Vgl. hierzu besonders den Beitrag von G. M. Rassweiler und G. L. Withrow in: The Science of Petroleum, siehe Anm. 2, 4. Bd., S. 2915.

[16] G. D. Boerlage und J. J. Broeze: Zündung und Verbrennung im Dieselmotor, VDI Forsch.-Heft Nr. 366, Berlin 1934.

[17] K. Zinner: Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 9, Bd. 83 (1939) S. 141 und 1073. Die beiden zuletzt genannten Arbeiten enthalten ausführliche Schrifttumsverzeichnisse. Vgl. hierzu auch F. A. F. Schmidt: Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzug und Klopfvorgang, und H. H. Wolfer: Der Zündverzug im Dieselmotor; VDI-Forsch. Heft Nr. 392, Berlin 1938, VDI-Verlag.

[18] Forsch. Ing. Wes. Bd. 9 (1938) S. 1; Z. VDI, Bd. 83 (1939) S. 183.

[19] Über die neueren, auf elektronentheoretischer Grundlage beruhenden Ansichten, die räumlichen Abstände zwischen den Atomen und die von den Verbindungslinien eingeschlossenen Winkel, siehe G. Wittig: Stereochemie, Akad. Verlagsges., Leipzig 1930; W. Hückel: Theoretische Grundlagen der organischen Chemie, Akad. Verlagsges., Leipzig 1931; H. A. Stuart: Molekülstruktur (Struktur und Eigenschaften der Materie, Bd. 14) Springer-Verlag Berlin 1934, sowie E. Müller: Neuere Anschauungen der organischen Chemie (Organische Chemie in Einzeldarstellungen Bd. 1) Springer-Verlag, Berlin 1940.

[20] E. Hückel: Z. Elektrochem. Bd. 43 (1937) S. 752 und 827; als Sonderabdruck, Grundzüge der Theorie ungesättigter und aromatischer Verbindungen, 2. Aufl., Berlin 1940, Verlag Chemie.

[21] H. Kölbel: Öl und Kohle, Bd. 14 (1938) S. 1042; Auszug daraus Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 1240.

[22] W. G. Lovell, J. M. Campbell und T. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 26 (1934) S. 1105.

[23] Eine zusammenfassende Darstellung hierüber bei W. Marder: Motorkraftstoffe, 1.Bd., Springer-Verlag Berlin 1942, S. 233 bis 362 oder K.L. Rumpf: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S.2 und 31

[24] A. W. Francis: Ind.Engng. Chem. Bd. 20 (1928); die von Francis seiner Darstellung zugrunde gelegten Zahlenwerte müssen zum Teil auf Grund neuerer Forschungen berichtigt werden. Eine kritische Zusammenstellung findet sich bei G. S. Parks und H. M. Huffmann: Free Energies of some organic Compounds, Chemical Catalogue Comp., New York 1932; siehe auch G. Egloff: Ind. Engng. Chem. Bd. 29 (1937) S. 1260.
Hier kommt es nur darauf an, den allgemeinen Verlauf erkennen zu lassen. Dimension und Bezifferung von Abb. 18 sind gegenüber der Wiedergabe bei Marder: Motorkraftstoffe 1. Bd. S. 239 ergänzt oder berichtigt. Einige Stichproben der Zahlenwerte an Hand der Angaben in Tafel 3126 von J. d'Ans und E. Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer-Verlag, Berlin 1943, S. 710 ff. zeigen nicht unerhebliche Abweichungen. Wegen der Berechnung der freien Bildungsenergie $\triangle F$ (nach Helmholtz), die identisch ist mit der größten Nutzarbeit einer Reaktion $N = \triangle I_B - T \cdot \triangle S$, wobei $\triangle I_B$ die Bildungsenthalpie in kcal/mol, T die absolute Temperatur in °K und $\triangle S$ die Differenz zwischen der Entropie der Verbindungen und der einzelnen Elemente in kcal/mol.Grad bedeuten; siehe die Vorbemerkungen zu der erwähnten Tafel und zu Tafel 3114 des "Taschenbuches" S. 310 f. oder A. Eucken: Grundriß der physikalischen Chemie, 4. Aufl., Akad. Verlagsges., Leipzig 1934, S. 128 ff, 300 ff.

[25] G. R. Schultze: Öl und Kohle, Bd. 12 (1938) S. 267 und Bd. 38

(1942) S. 1448; die in der Tafel für die Gleichgewichtskonstante K_p der ersten Arbeit nach der Formel $\Delta F = - R T \ln K_p$ errechneten Werte decken sich ebenfalls nicht vollständig mit dem nach dem "Taschenbuch" [32] bestimmten. Wichtig sind diese Zahlenangaben für die Berechnung von Spaltreaktionen. Sie müßten erforderlichenfalls an Hand der Angaben in Landolt-Börnstein überprüft werden.

[26] Vgl. das Buch von H. Müller [19], S. 114

[27] Einen Überblick über den neueren Stand der Entwicklung auf dem Gebiete der Pyrolyse-, Polymerisierungs- und Alkylierungsverfahren findet man in dem schon wiederholt genannten Buch von H. Marder 23, S. 362 bis 459.

[28] H. Koch: Brennstoff-Chem. Bd. 20 (1939) S. 1; Auszug daraus Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 1143.

[29] Zu diesem Zwecke wurden nach dem Vorschlag der Fa. Still Rohre verwendet, die von der Wanddecke senkrecht in die Kammerfüllung eingeführt werden, jedoch vor dem Ausstoßen des fertiggebildeten Kokskuchens entfernt werden müssen. Einen anderen Weg schlug H. [illegible] ein, der die Destillationsgase durch Öffnungen in den Kammerwänden absaugt und sich dabei die Undurchlässigkeit der über die ganze Kammertiefe reichenden Teernaht zu Nutze macht. Vgl. hierzu: H. [illegible]: Glückauf, Bd. 73 (1937) S. 705; Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 43.

[30] F. Wilke, Automobiltechn. [illegible] Bd. 43 (1940) S. 148

[31] H. Marder: Motorkraftstoffe 1. Bd. Springer-Verlag Berlin 1942, S. 499. Die dort zu findenden Bezeichnungen sind teilweise berichtigt oder vereinheitlicht.

[32] Z. Elektrochem. Bd. 42 ([illegible]) S. 468; siehe auch [12].

[33] The Science of Petroleum, vgl. Anm. 2, 4. Bd. S. 2994.

[34] F. Mohry: Dissertation, techn. Hochsch. München 1936, sowie A. W. Schmidt und F. Mohry: Öl und Kohle, Bd. 36 (1940) S. 122.

[35] Eine Übersicht über die zahlreichen diesbezüglichen Versuche gibt R. Singer: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 371/376, der auch über die Bemühungen berichtet, den Kopf des Springstabgerätes so zu verbessern, daß subjektive Einflüsse bei seiner Einstellung nach Möglichkeit ausgeschaltet werden. Siehe auch K. Weber: Arch. techn. Messen, V 8234-1 (1940).

[36] Vgl. F. Lichtenberger und F. Zeeber: Autom. techn. Z. Bd. 41, (1938) S. 372; Kraftstoff Bd. 17 (1941) S. 173 und 206; Z VDI Bd. 86 (1942) S. 181.

[37] Eine gedrängte Übersicht der bei den Fahrversuchen des CFR erzielten Ergebnisse findet sich bei E. Kneule: Z. VDI, Bd. 85 (1941) S. 571 mit einer ausführlichen Schrifttumsübersicht.

[38] Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 370.

[39] F. Kneule: Über diesbezügliche amerikanische Untersuchungen, Z. VDI, Bd. 84 (1940) S. 869.

[40] Z. VDI Bd. 2 (1938) S. 1455.

[41] Insbesondere R. Singer: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 359/363, Bd. 39 (1943) S. 899/902; H. Dannefelser: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 363/65, 376/381, Bd. 39 (1943) S. 905/910.

[42] Näheres findet sich bei G. Kessler: Öl und Kohle Bd. 14 (1938) S. 341, sowie auszugsweise bei H. Lindner: Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25, insbesondere Bild 21 bis 24 S. 32.

[43] E. Köhler: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 381/383.

[44] L. E. Hebl, T. B. Rendel und C. E. Garton: Ind.Engeng. Chem., Analyt. edit. Bd. 25 (1935) S. 187, Bd. 31 (1939) S. 863.

[45] Th. Hemmerich: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 1275 und die Stellungnahme von E. Singer: Öl und Kohle Bd. 39 (1943) S. 424 mit Erwiderung von Th. Hemmerich, S. 427.

[46] F. Fuß: Öl und Kohle Bd. 39 (1943) S. 910.

[47] Öl und Kohle, Bd. 39 (1943) S. 915.

[48] F. Spausta: Treibstoffe für Verbrennungsmotoren, Wien 1939, Springer-Verlag, S. 185 ff.

[49] H. Scheunemann: Nat. Petrol. News Bd. 19 (1940) S. 122 u. 126.

[50] F. Seeber: Luftf.-Forsch. Bd. 16 (1939) S. 184 und 311; A. v. Philippovich: Öl und Kohle, Bd. 15 (1939) S. 551; Auszug daraus Z. VDI Bd. 85 (1941) S. 369.

[51] W. Wilke: Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 1135; E. Meyer: Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 609 und H. Lindner: Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25.

[52] G. Kemsler: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S. 1031.

[53] H. Weber: Öl und Kohle, Bd. 12 (1936) S. 371.

[54] H. Weber: Öl und Kohle, Bd. 36 (1940) S. 78.

[55] H. Marder: Öl und Kohle, Bd. 11 (1935) S. 1, 41, 75, 154, 182, 222, 983; R. Heinze und M. Marder: Brennst.-Chem. Bd. 16 (1935) S. 286; R. Heinze u. A. Hopf: Brennst.-Chem. Bd. 17 (1936) S. 441; R. Heinze und M. Marder: Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 37; M. Marder u. P. Schneider: Automobiltechn. Z. Bd. 39 (1937) S. 195; G. Vorberg: Öl und Kohle Bd. 16/35 (1939) S. 497 und Bd. 39 (1943) S. 847 sowie G. Eidmaier: Öl und Kohle, Bd. 35 (1939) S. 761.

[56] Kraftstoff, Bd. 17 ([illegible]) S. 218.

[57] Die diesbezüglichen Vorschläge stammen von J. C. Vlugter, H. I. Waterman und H. A. van Westen: J. Inst. Petrol. Technol. Bd. 18 (1932) S. 735 und Bd. 21 (1935) S. 661 und 701. Wegen einer kritischen Nachprüfung für Schmieröl-Kohlenwasserstoffe siehe G. R. Schultze und J. C. Nicolai: Öl und Kohle Bd. 37 (1941) S. 617. Eine Bearbeitung des Verfahrens findet sich auch bei E. H. Kadmer: Schmierstoffe und Maschinenschmierung, Verlag Borntraeger, Berlin 1940, S. 117 ff.

[58] A. Eucken: Grundriß der physikalischen Chemie, 4. Aufl., Akad. Verlagsges. Leipzig 1934, S. 490 ff.

[59] Angew. Chem. Bd. 46 (1933) S. 335 und 776.

[60] Refiner natur. Gasol. Manufact. Bd. 19 (1940) Nr. 2 und den Bericht über diese Arbeit von R. Tannenberger und O. Seifert: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 1028.

[61] Dieses Verfahren ist unter D 285-30T des Berichtes 1932 des Committee D. 2 der American Society for Testing Materials, S. 80 ff. festgelegt.

[62] Öl und Kohle, Bd. 14 (1938) S. 1021.

[63] A. Dadieu: Angew. Chem. Bd. 43 (1930) S. 800; Bd. 49 (1936) S. 443; und R. Kremann: Zusammenhänge zwischen physikalischen Eigenschaften und chemischer Konstitution unter Mitarbeit von M. Pestemer in: Wissenschaftl. Forsch. Berichte, Naturwissenschaftl. Reihe, Bd. 41, 2. unver. Aufl. Dresden 1943, Verlag Steinkopf.

[64] H. Stallechner: Zündverzugsmessung mittels Photozellen in verschiedenen Wellengebieten. Dtsch. Kraftf.-Forschg. Heft 43, VDI-Verlag, Berlin 1941, S. 31, sowie L. Wisong, Z. VDI Bd. 86

(1942) S. 241. Dort auch Hinweise auf frühere Arbeiten von Bisang und verschiedenen amerikanischen Forschern.

[65] Luftf.-Forschg. Bd. 18 (1941) S. 5.

[66] G. Edgar u. H. A. Bentley: J. Amer. chem. Soc. Bd. 56 (1934) S. 102, wiedergegeben in dem Buch von W. Jost [6].

[67] E. Schmidt u. E. Mühlner: Forschg. Ing.-Wes. Bd. 13 (1942) S. 186; Auszug daraus in Z. VDI Bd. 87 (1943) S. 333; E. Mühlner: Luftf.-Forschg. Bd. 19 (1942) S. 249.

[68] W. Jost: Z. Elektrochem. Bd. 47 (1941) S. 262; H. Teichmann ebenda S. 274.

[69] F. A. F. Schmidt: [illegible] die Beeinflussung von [illegible]bildung und Zündungsvorgang im Verbrennungsmotor. Schr. Dtsch. Akad. Luftf.-Forschg. Heft 9, München 1939, Verlag R. Oldenbourg, sowie Motortechn. Z. Bd. 5 (1943) S. 41; M. Scheuermeyer und H. Steigerwald: Motortechn. Z. Bd. 5 (1943) S. 229.

[70] Öl und Kohle Bd. 40 ([illegible]) S. 664.

[71] Ind. Engng. Chem., Ind. Edit. Bd. 33 (1941) S. 545. Ausführlicher Bericht darüber in: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S. 15.

[72] G. Egloff und Mitarbeiter: J. Inst. Petrol. Technol. Bd. 27 (1941) S. 121 und 2[illegible].

Verzeichnis der Abbildungen und ihrer Unterschriften

Abb. 1 a u. b Indikatordiagramm (Druckverlauf p über Kurbelwinkel φ) und Schwingung s der Gasmasse bei normaler (a) und bei klopfender (b) Verbrennung in einem Ottomotor.

Abb. 2 Einfluß der Luftüberschußzahl λ bei der Verbrennung eines Pentan-Luft-Gemisches. Anfangsdruck p_a = 2,5 ata; Anfangstemperatur t_a = 30°.
k_{max} = größter Klopfschwingungsausschlag
v = mittlere Brenngeschwindigkeit
π = größtes Drucksteigerungsverhältnis

Abb. 3 Größte Klopfschwingungs-Ausschläge k_{max} für ein Pentan-Luft-Gemisch (a) und ein Benzol-Luft-Gemisch (b) abhängig von der Luftüberschußzahl λ. Anfangsdruck 2,5 ata; Anfangstemp. t_a = 30°.

Abb. 4 Größte Klopfschwingungs-Ausschläge k_{max} bei der Verbrennung eines Pentan-Luft-Gemisches in Abhängigkeit vom Anfangsdruck p_a in der Bombe bei einer Anfangstemperatur t_a = [illegible]° für verschiedene Luftüberschußzahlen λ.

Abb. 5 Verlauf der Klopfschwingungsausschläge k_{max} bei der Verbrennung eines Benzol-Luft-Gemisches abhängig von der Luftüberschußzahl λ bei zwei verschiedenen Anfangstemperaturen t_a; Anfangsdruck p_a = 2,5 ata.

Abb. 6 Klopfgrenze bei Änderung der Temperatur t_L und des Druckes p_L der Ladeluft für zwei Luftüberschußzahlen λ. n = 2[illegible] U/min; ε = 1 : 7; Kraftstoff: Benzin; Motor: wassergekühlt.

Abb. 7 Mittlerer Nutzdruck p_e und bezogener Kraftstoffver-

brauch b_e in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl λ bei verschiedenen Ottomotoren. Die Werte für p_e und b_e sind des besseren Vergleichs wegen so umgerechnet, daß sich bei $\lambda = 1,0$ für beide Werte 100 % ergeben.

	Hubraum	n	ε
Kurve a: wassergekühlt	4 l	1770 U/min	1 : 5,5
" b: luftgekühlt	3 l	-	-
" c: wassergekühlt	-	-	-
" d:	2 l	2600 U/min	1 : 8
" e: luftgekühlt	1 l	3500 "	1 : 6,8

Abb. 8 Idealer (a) und tatsächlicher (b) Druckverlauf p über dem Kurbelwinkel φ bei der Verbrennung im Dieselmotor. 1 Zündverzug; 2 Durchzünden; 3 gesteuerte Verbrennung (bis Einspritzende); 4 Nachbrennen.

Abb. 9 a, b und c Zündverzug t_v in °KW. (Gradkurbelwinkel), Drucksteigerungsgeschwindigkeit dp/dt und Höchstdruck p_{max} für verschiedene Kraftstoffe abhängig von der je Zylinder zugeführten Wärmemenge Q in einem Dieselmotor.

a Gasöl;
b Braunkohlenteeröl
c Steinkohlenschwelteer
d Steinkohlenteeröl
e chemisch behandeltes Steinkohlenteeröl

Abb. 10 a bis d Druckverlauf p beim Dieselmotor abhängig vom Kurbelwinkel und vom Kolbenweg v_h.

a ohne Einspritzung
b Einspritzbeginn 10° vor oberem Totpunkt bei normaler Drehzahl
c Einspritzbeginn bei einer um 50 % höheren Drehzahl soweit vorverlegt, daß Zündung wie bei b eintritt
d wie c, aber Verbrennungsende wie bei b

Bedeutung von 1 bis 4 wie in Abb. 8; v_k Kompressionsraum.

Abb. 11 Siedepunkt t_s von Normal- und Isoparaffinen mit fünf bis zehn Kohlenstoffatomen. Die eingetragenen Siedepunkte der verzweigten Kohlenwasserstoffe sind Mittelwerte. Die

sind für Nonane und Dekane wegen der verhältnismäßig geringen Zahl bekannter Isomeren noch unsicher.

a Normalparaffine
b Isomere mit 1 Verzweigung
c Isomere mit 2 Verzweigungen
d Isomere mit 3 Verzweigungen
e Isomere mit 4 Verzweigungen

Z_C = Kohlenstoffatomzahl
M_G = Molekulargewicht
$Z_{i\ max}$ = Zahl der möglichen Isomeren
Z_i = Zahl der bekannten und untersuchten Isomeren
△ = unberücksichtigte anormale Werte.

Abb.12 a u. b Atomgitter der beiden Kohlenstoff-Modifikationen Graphit und Diamant.

Abb.13 Anordnung, Abstände und Winkel der Kohlenstoffatome in der ebenen Zick-Zack-Kette des n-Heptans. Die Wasserstoffatome stehen derart im Raume, daß die Kohlenstoffatome im Mittelpunkt von Tetraedern erscheinen.

Abb.14 Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit einem Misch-Diesel-Kraftstoff (ausgezogene Linien) und einem handelsüblichen Gasöl (gestrichelte Linien) in einem 30/35 PS Vierzylindermotor bei 1450 U/min in Abhängigkeit von der Leistung N.
a Spezifischer Kraftstoff-Verbrauch b_e
b Auspufftemperatur t_a
c Kohlenmonoxydgehalt der Auspuffgase x_{CO}

Abb.15 Höchstes nutzbares Verdichtungsverhältnis ε_{max} abhängig vom Molenbruch x der klopffesteren Komponente einiger Kraftstoffgemische, nach dem alten Research-Verfahren (vgl. Abschnitt II 1) ermittelt.
a i-Oktan in n-Heptan
b Benzol in n-Heptan

c Zyklohexan in n-Heptan
d Benzol in i-Oktan
e Dizyklopentadien in i-Oktan
f ungefähres Gebiet der Handelsbenzine aus Erdöl.

Abb.16 Schematische Darstellung der Änderung der Klopffestigkeit von Kraftstoffen bei Mischung.

Abb.17 Die Veränderung des kritischen Verdichtungsverhältnisses ε_{kr} ungesättigter Kettenkohlenwasserstoffe gegenüber den gesättigten gleicher Kohlenstoffatomzahl.
a Äthan; b Propan; d Pentan; e Hexan; f Heptan; g Oktan.

Abb.18 Freie Bildungsenergie ΔF bezogen auf ein Kohlenstoffatom der Verbindung für einige Paraffine, Olefine, Aromaten sowie für Azethylen abhängig von der Temperatur t.
a Methan; b Äthan; c n-Hexan; d n-Oktan; e Äthylen; f n-Hexen; g Zyklohexan; h Benzol; i Toluol; k Naphthalin; l Azetylen.

Abb.19 Das kritische Verdichtungsverhältnis ε_{kr} beim Betrieb im Ottomotor für einige Normal- und Isoparaffine niedriger Kohlenstoffatomzahl Z_c in Abhängigkeit von dieser.
a Äthan; b Propan; c Pentan; d Hexan; e Heptan; f Oktan.

Abb.20 Einfluß verschiedener Zusätze Z auf die nach dem CFR-Motor-Verfahren gemessene Oktanzahl Z_{OZ} eines Destillatbenzines von der Grundoktanzahl 70.
a Diisopropyläther; b Isooktan; c Isopentan; d Benzol.

Abb.21 Die relative Gegenklopfwirkung K_a von 1 Grammatom Stickstoff verschiedener Anilinabkömmlinge, ausgedrückt in Anilinäquivalenten in Abhängigkeit von der Kohlenstoffatomzahl Z_c je Molekül und der Struktur.

Abb.22 Kritisches Verdichtungsverhältnis ε_{kr} verschiedener $\Delta\varepsilon$
Kohlenwasserstoffgruppen und seine Änderung bei Zusatz von 1 cm^3 Bleitetraäthyl je Gallone (3,79 l).

Paraffine und Naphthene; △ Aromaten (gesätt. Seitenketten); ∘ α-Olefine, Diolefine, Acetylene; andere Olefine; ▫ ungesättigte Ringverbindungen.

a Benzinbereich
b Paraffine und Naphthene
c ungesätt. Kettenkohlenwasserstoffe
d ungesätt. Ringverbindungen.

Abb.23 Klopfausschlag d^2p/dt^2 abhängig vom Ladedruck p_L.
A Klopfbeginn.
Die für zwei Versuchsreihen eingetragenen Punkte lassen die Wiederholbarkeit gut erkennen.

Abb.24 I.G.-Prüfmotor für Ottokraftstoffe.

Bohrung		65 mm
Hub		100 mm
Hubraum		332 cm^3
Leistung	rd.	1 kW
Drehzahl		1600 U/min.

a Springstabindikator
b Schnecke mit Schneckenrad zum Verändern des Verdichtungsverhältnisses
c Skala für Verdichtungsverhältnis
d Skala für Drehzahl
e Vergaser
f Unterbrecher.

Abb.25 a u. b Verteilung der Streugrenzen bei den im Motor 1942 durchgeführten Vergleichsmessungen.
a nach dem Research-Verfahren
b nach dem Motor-Verfahren

Ordinate y = Zahl der Meßwerte in % innerhalb der Streugrenzen x

Abszisse x = Streugrenze in ± ROZ bzw. ± MOZ

ROZ = Research-Oktanzahl

MOZ = Motor-Oktanzahl.

Abb.26 Diagramm zur Bestimmung der mathematischen Bleiempfindlichkeit (F_m) von Ottokraftstoffen.

x_1 = Abszisse Motor-Methode;

x_2 = Abszisse Research-Methode;

a = CFR-Motor-Methode;

b = CFR-Research-Methode.

Motor-Methode $F_m = \frac{\Delta OZ}{50 \log 100 c + 15}$

Research-Methode $F_m = \frac{\Delta OZ}{50 \log 100 c + 2}$

c Vol.%	50 log 100 c	c Vol.%	50 log 100 c	cm^3 in U.S.Gallons	c Vol.%	50 log 100 c
0,02	15,05	0,07	42,25	0,05	0,0132	6,0
0,03	23,85	0,08	45,15	1,—	0,0294	20,1
0,04	30,10	0,09	47,40	2,—	0,0539	36,2
0,05	34,85	0,10	50,00	3,—	0,0793	45,0
0,06	38,90	0,11	52,10	4,—	0,1097	51,2

Abb.27 Einfluß des Schwefelgehaltes s auf die Bleiempfindlichkeit F_m von Benzinen mit einer Grund-Oktanzahl OZ_0 von 65 bis 68 für das CFR-Motorverfahren.

a Straight-run-Benzine; b Spaltbenzine.

Abb.28 a u. b Mittlerer nutzbarer Kolbendruck p_{me} und höchster zulässiger Ladedruck $p_{L\,max}$ an der Klopfgrenze für einen Kraftstoff mit einer nach dem Motorverfahren gemessenen Oktanzahl (MOZ) von 87 in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl λ, in einem luftgekühlten Einzylindermotor ermittelt.

Abb.29 I.G.-Prüfmotor für Dieselkraftstoffe in Kreuz- und Aufriß.

Bohrung		95 mm
Hub		150 mm
Hubraum		1063 cm³
Leistung	rd.	5 kw
Drehzahl		1000 U/min

(veränderlich zwischen 500 und 2000 U/min)

a Düsenhalter und Einspritzkontakt
b Handrad zum Verändern des Verdichtungsverhältnisses
c Handrad zum Festklemmen des Zylinderkopfes
d Kraftstoffpumpe
e Seitenablenkgerät für den Indikator

Abb.30 a u. b Zetanzahl Z_a Z abhängig vom Verdichtungsverhältnis und Zündverzug t_v in °K.-W.

Abb.31 Sauerstoffverbrauch in Mol je Mol Kohlenwasserstoff, abhängig von der Temperatur t für die Oxydation isomerer Oktane mit Luft im stöchiometrischen Verhältnis.

a n-Oktan
b 3-Methylheptan
c 3-Äthylhexan
d 2,5-Dimethylhexan
e 2-Methyl-3-Äthylpentan
f 2,2,4-Trimethylpentan

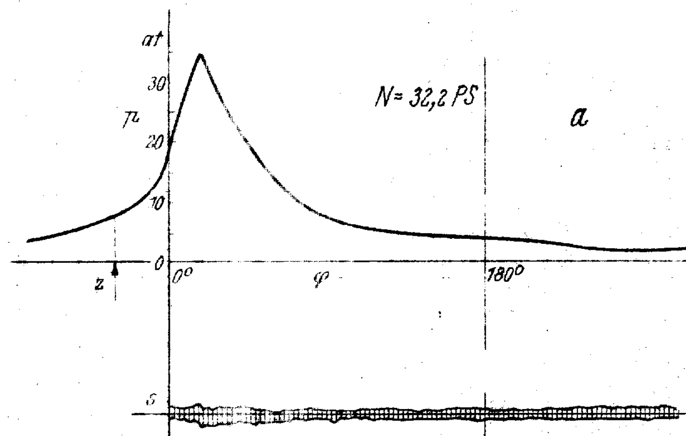
Abb.32 In Oktanzahlen ausgedrückte, nach dem Motorverfahren ermittelte Klopffestigkeit (MOZ) unverzweigter Paraffine und Olefine, abhängig vom Molvolumen V_M und der molaren Entropie S_M für die Gasphasen bei 298° K berechnet.

◦ Paraffine • Olefine

- - - - -

Verzeichnis der Zahlentafeln

- - - - -



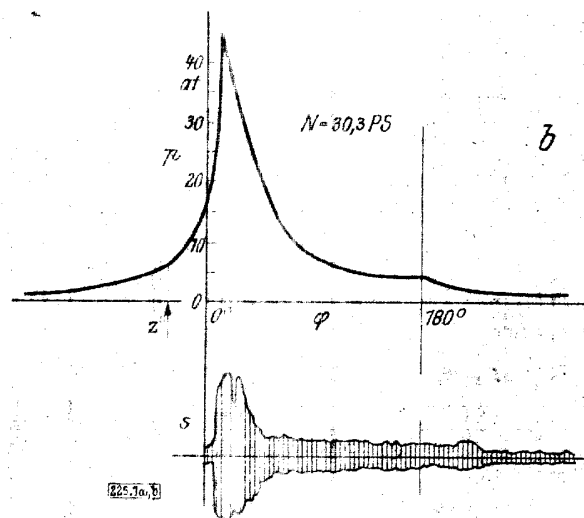


Abb. 1a,b
Рис. 1а,б

Normblattvordruck klar A 4

Fabriknorm, Berlin-Friedenau — C 1419

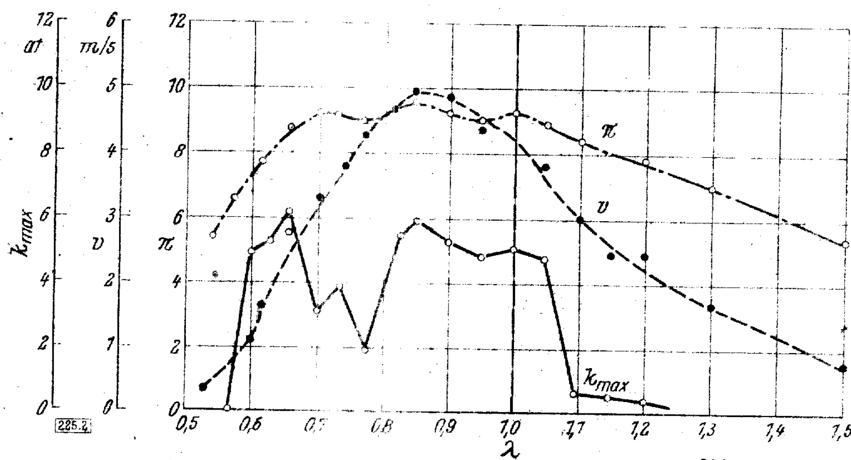


Abb. 2 Рис. 2

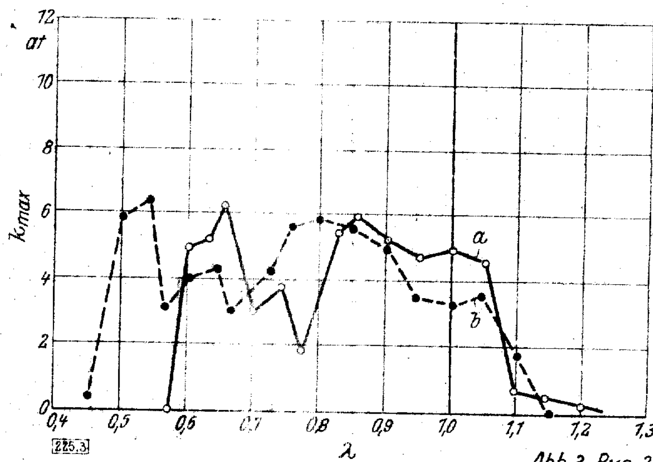


Abb. 3 Рис. 3

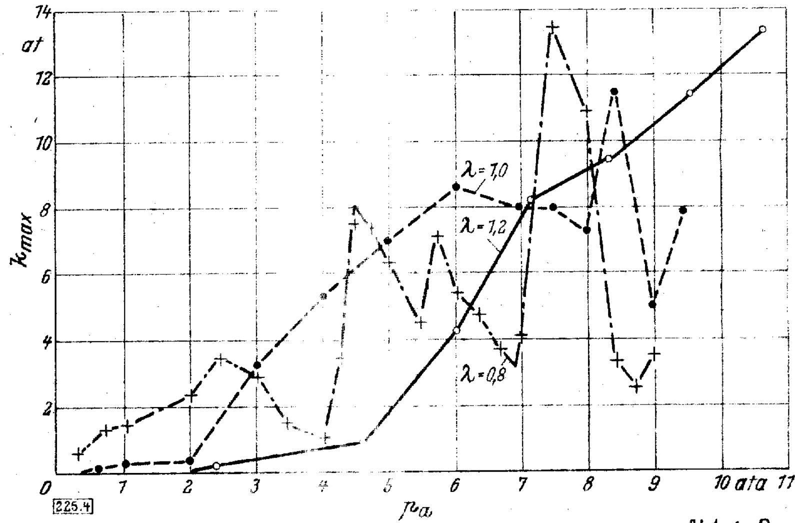


Abb.4 Рис.4

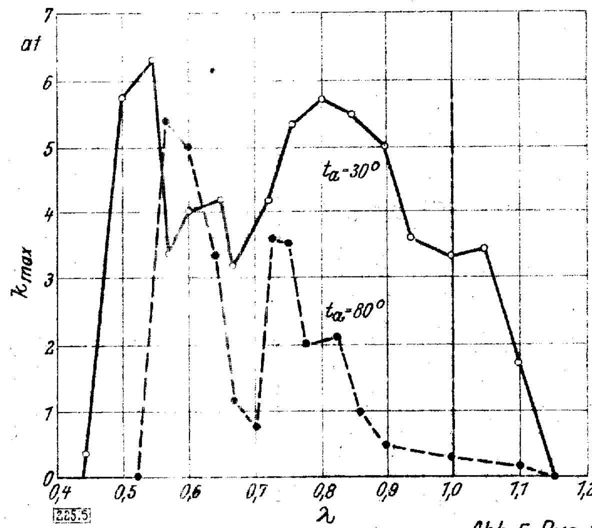


Abb.5 Рис.5

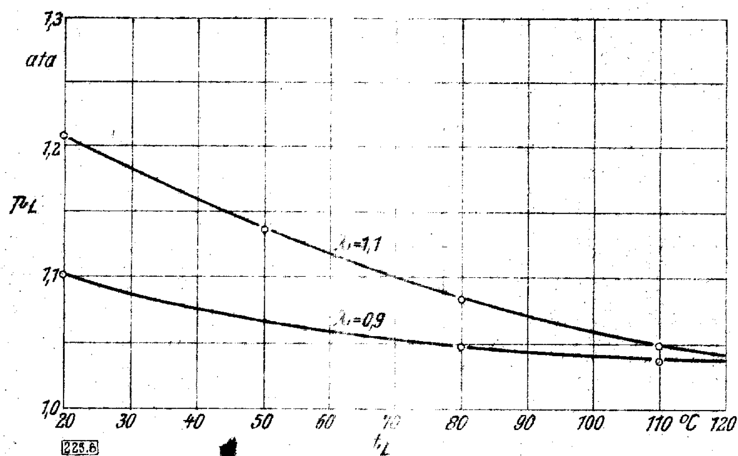


Abb.6 Рис.6

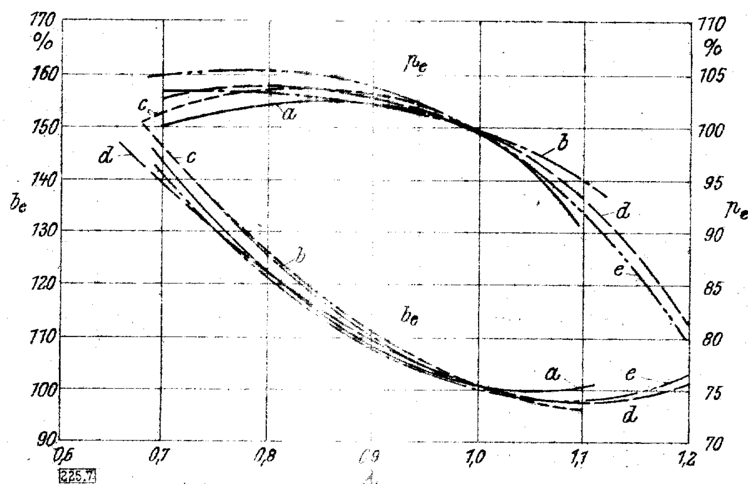


Abb.7 Рис 7

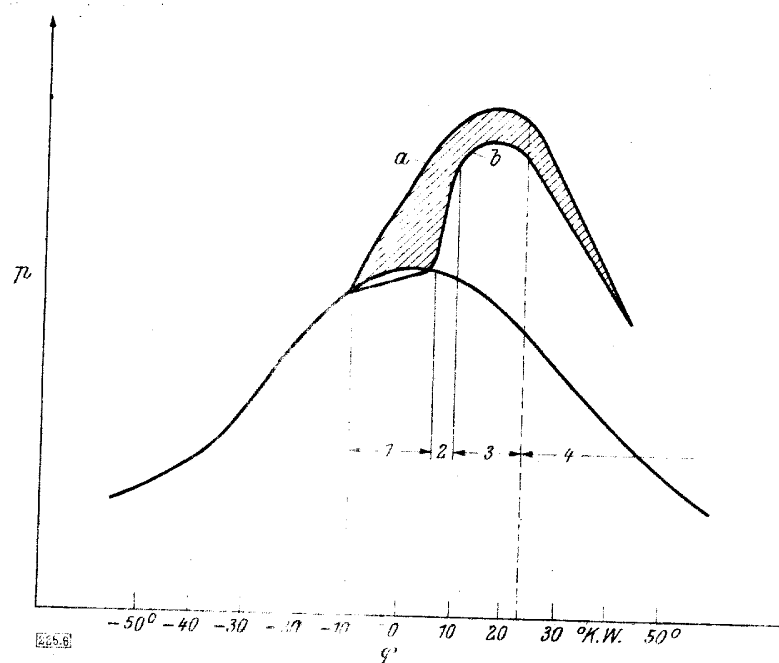
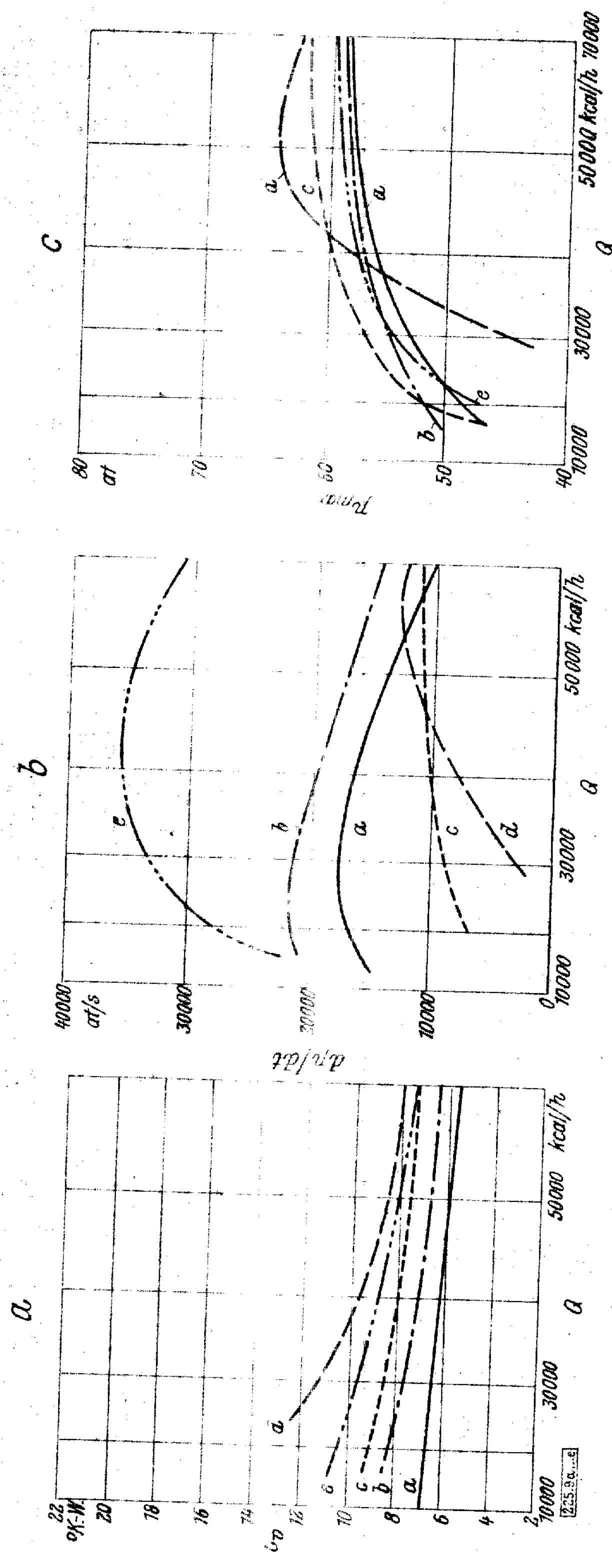


Abb. 8
Рис. 8


a
b
c
kcal/h
Q
d_r/dt
at/s
at
Abb. 9a...c
Рис. 9a...в

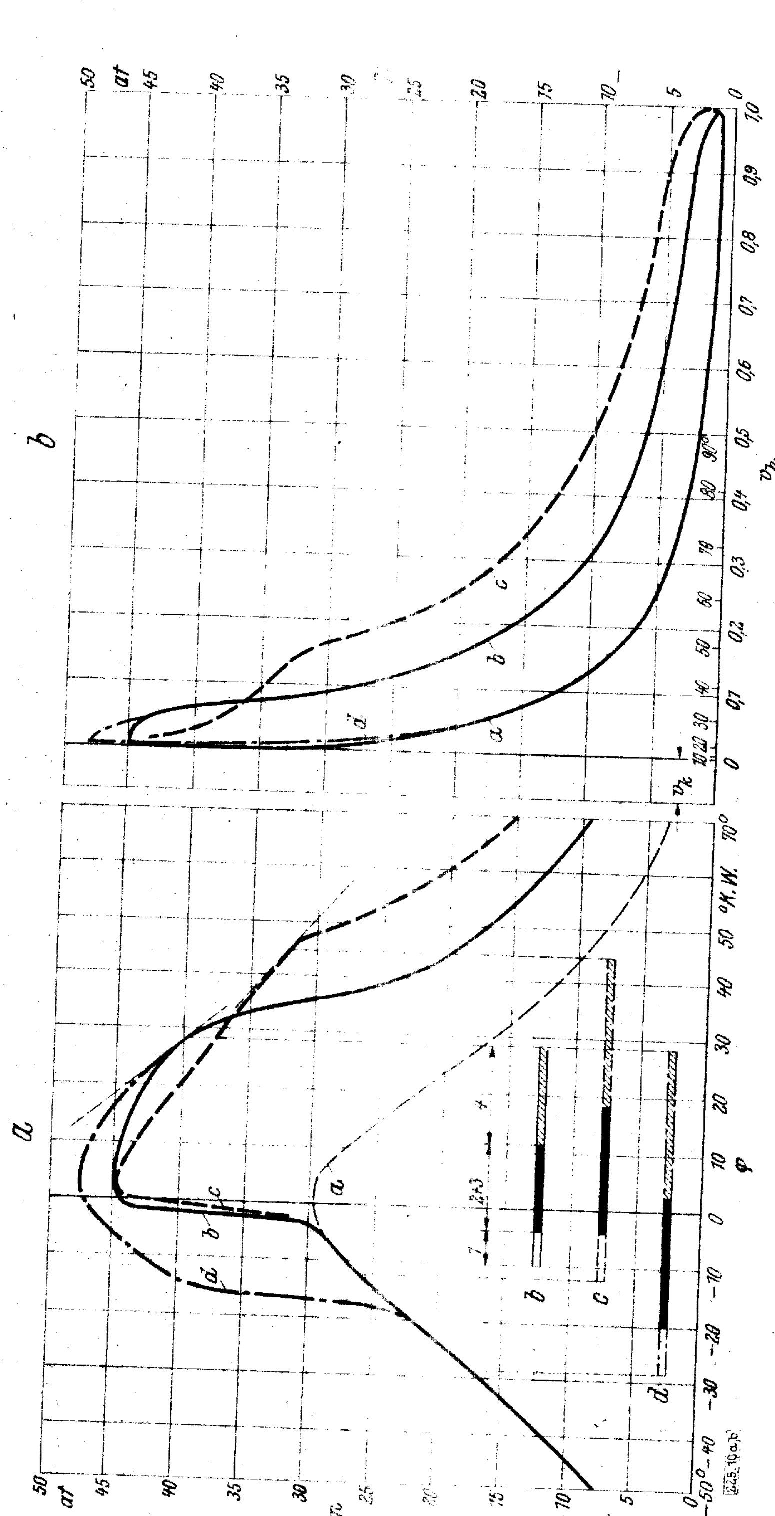
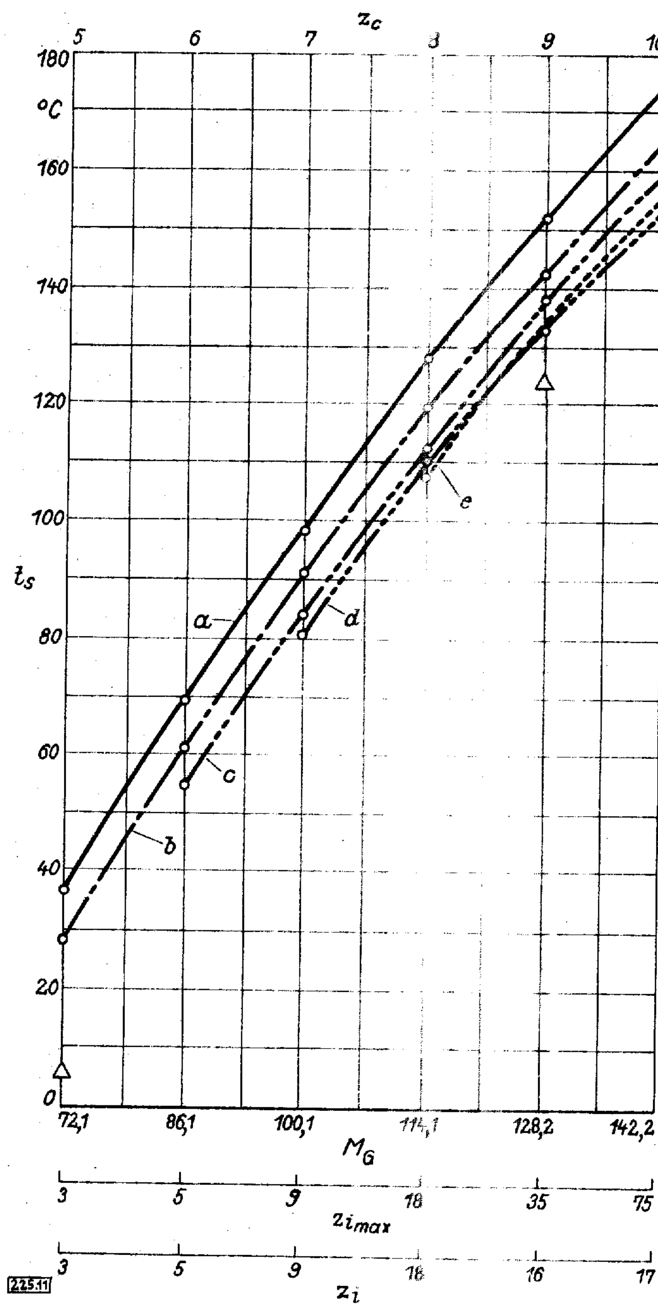


Abb. 10a, b
Рис. 10а,б

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



z_c
5
6
7
8
9
10
180
°C
160
140
120
100
t_s
80
60
40
20
0
a
b
c
d
e
72,1
86,1
100,1
114,1
128,2
142,2
M_G
3
5
9
18
35
75
$z_{i_{max}}$
3
5
9
18
16
17
z_i
225.11

Abb. 11
Рис. 11

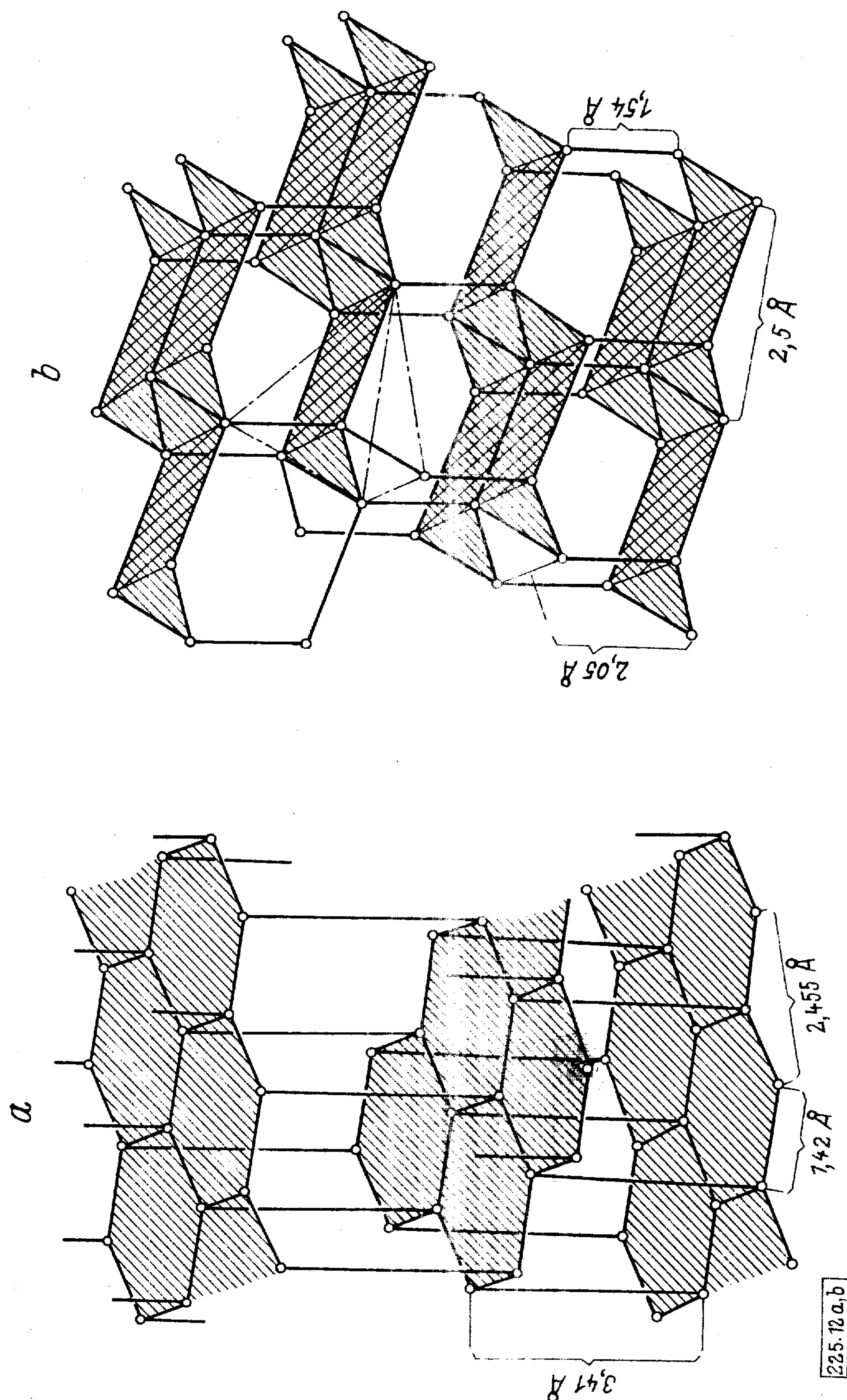


Abb.12a,b Рис.12 а,б

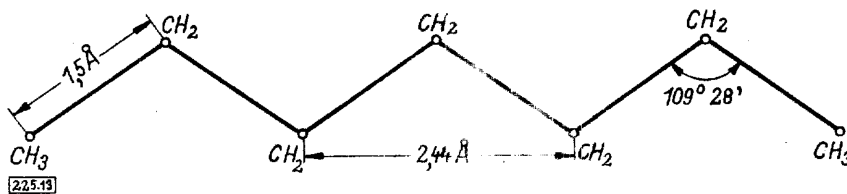


Abb. 13
Рис. 13

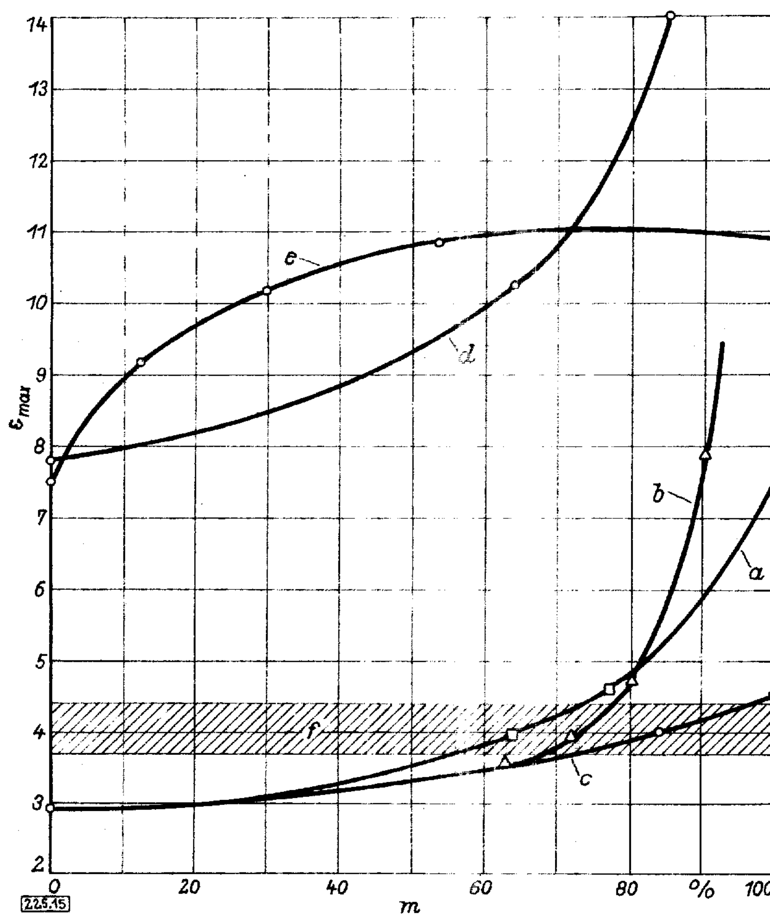


Abb. 15
Рис. 15

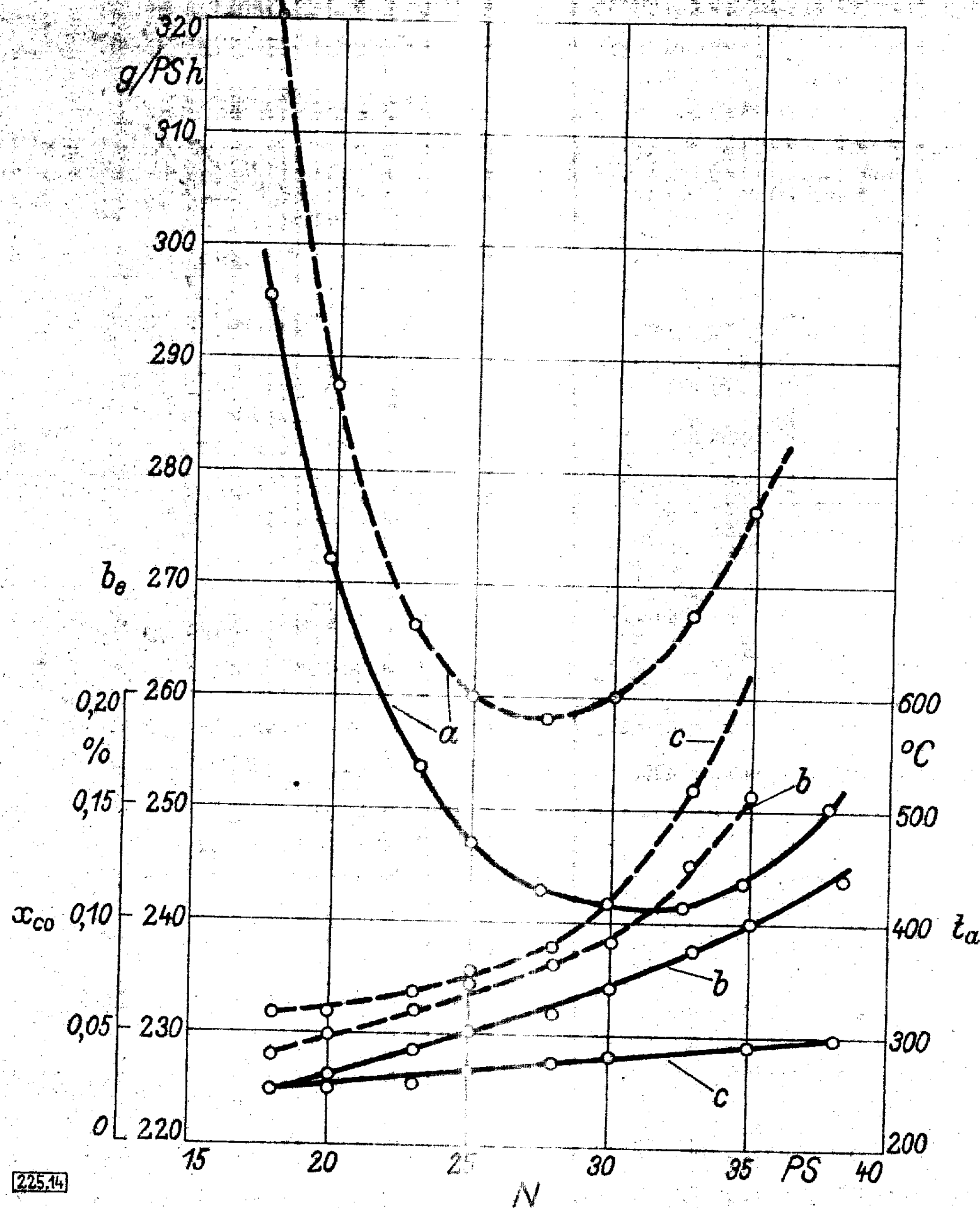

320
g/PSh
310
300
290
280
b_e 270
260
250
240
230
220
0,20
%
0,15
x_{co} 0,10
0,05
0
600
°C
500
400 t_a
300
200
a
b
c
15
20
25
30
35
PS
40
N
225,14

Abb. 14
Рис. 14

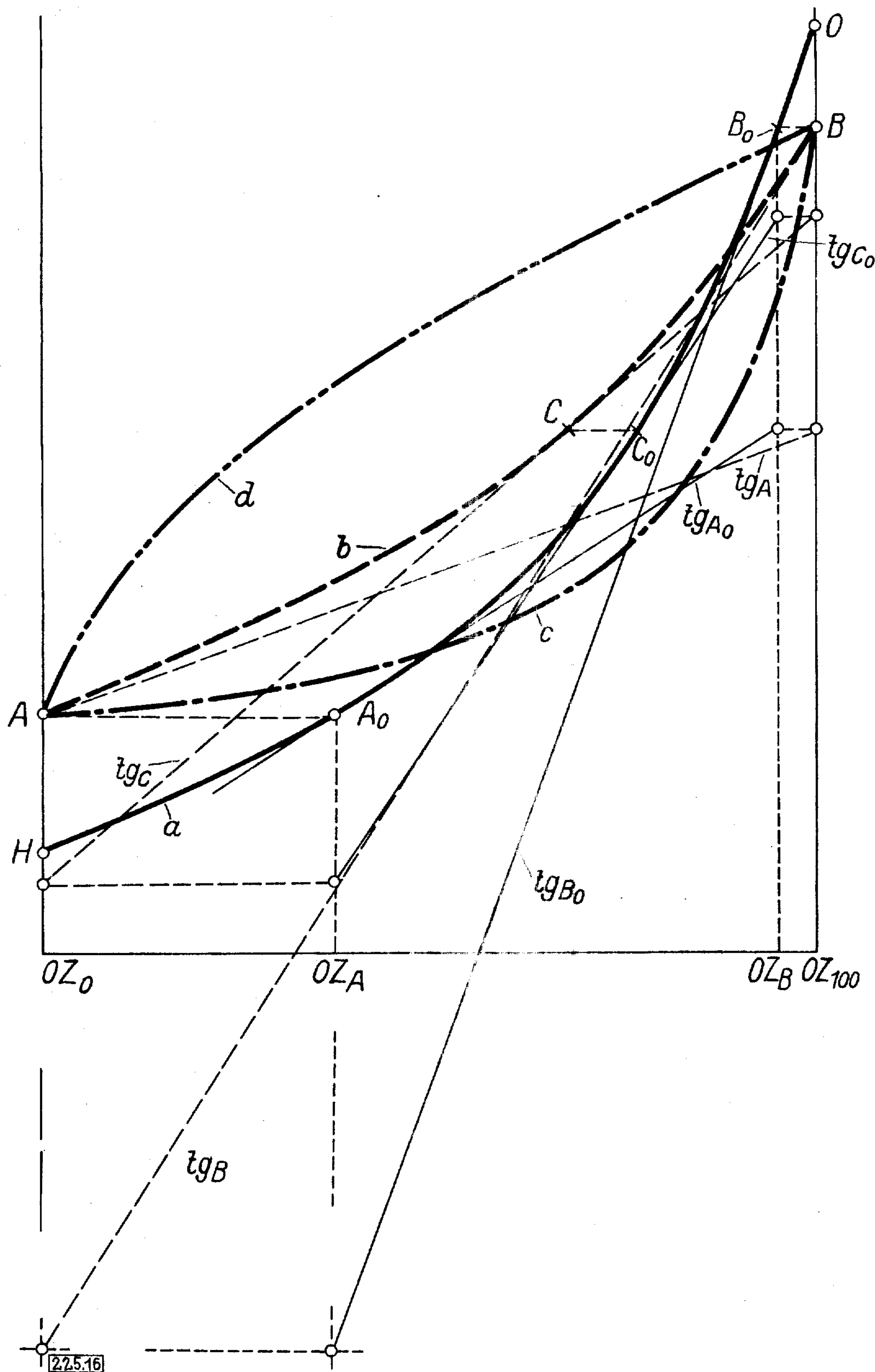

O
B
B_o
tg_{C_o}
C
C_o
tg_A
tg_{A_o}
d
b
c
A
A_o
tg_C
a
H
tg_{B_o}
OZ_0
OZ_A
OZ_B
OZ_{100}
tg_B
22.5.16

Abb. 16
Рис. 16

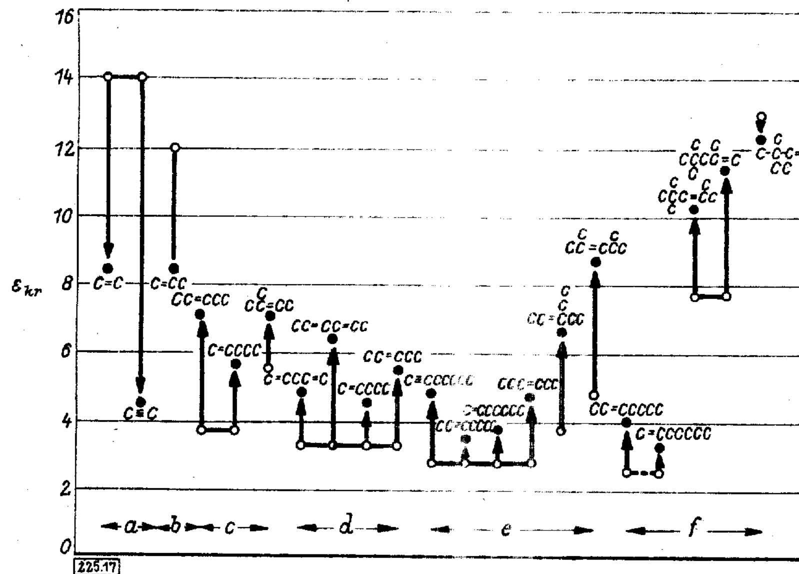


Abb. 17
Рис. 17

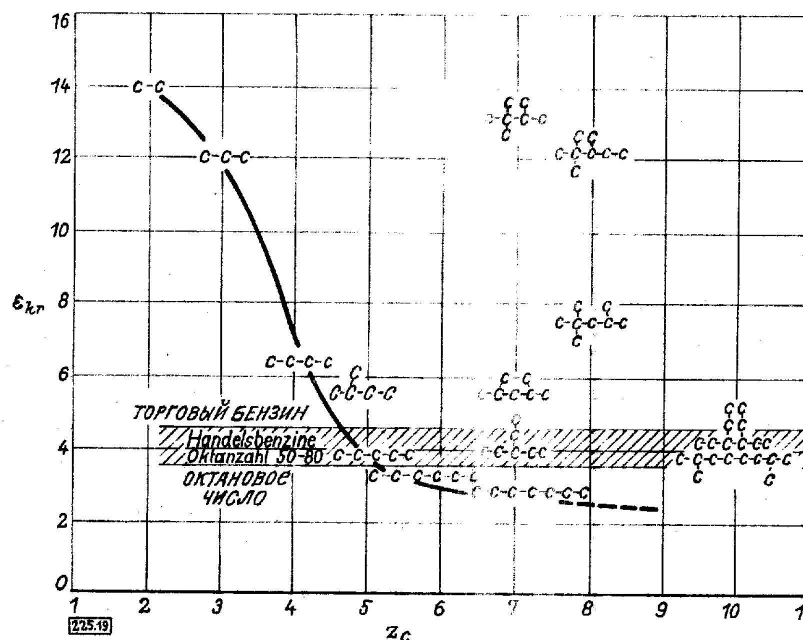
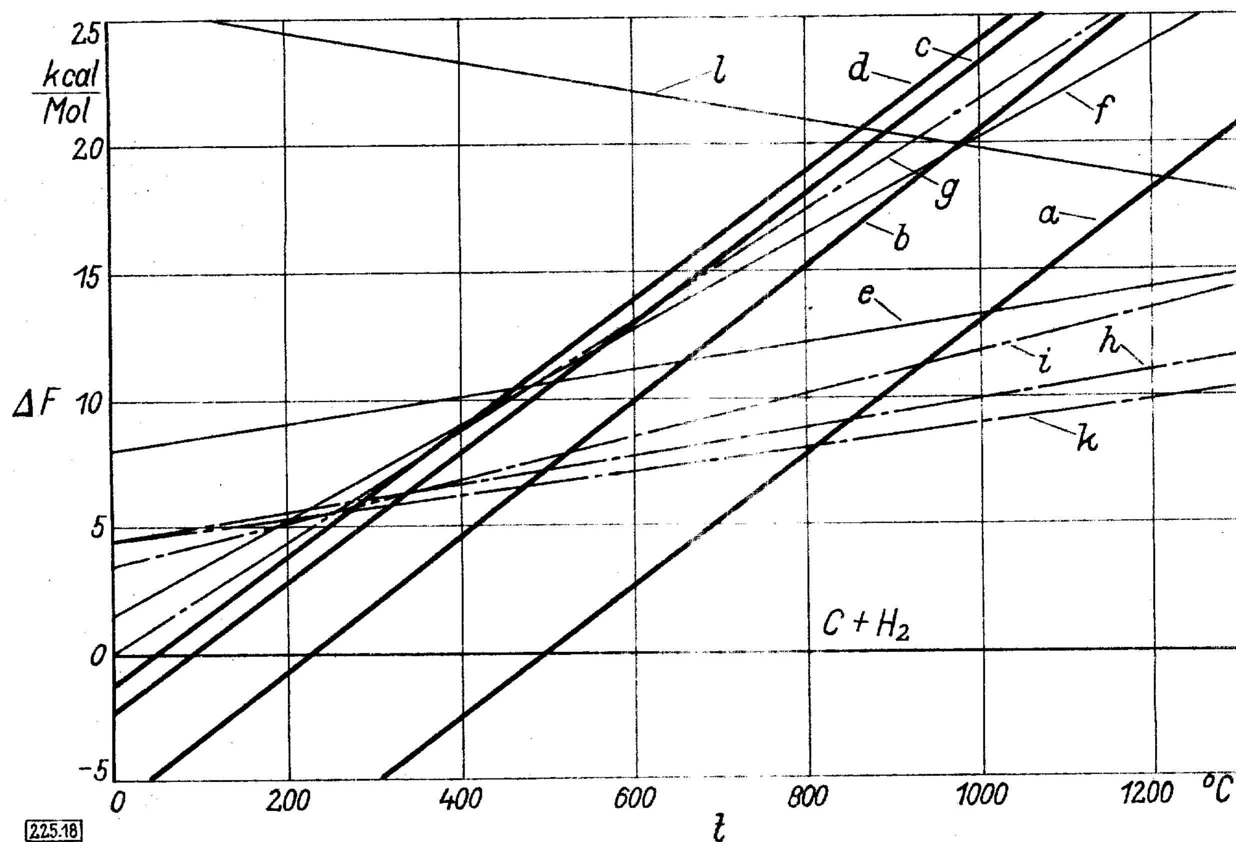


Abb. 19
Рис. 19



25
kcal/Mol
20
15
ΔF 10
5
0
-5
0
200
400
600
800
1000
1200 °C
t
l
d
c
f
g
b
a
e
i
h
k
C + H2
225.18

Abb. 18
Рис. 18

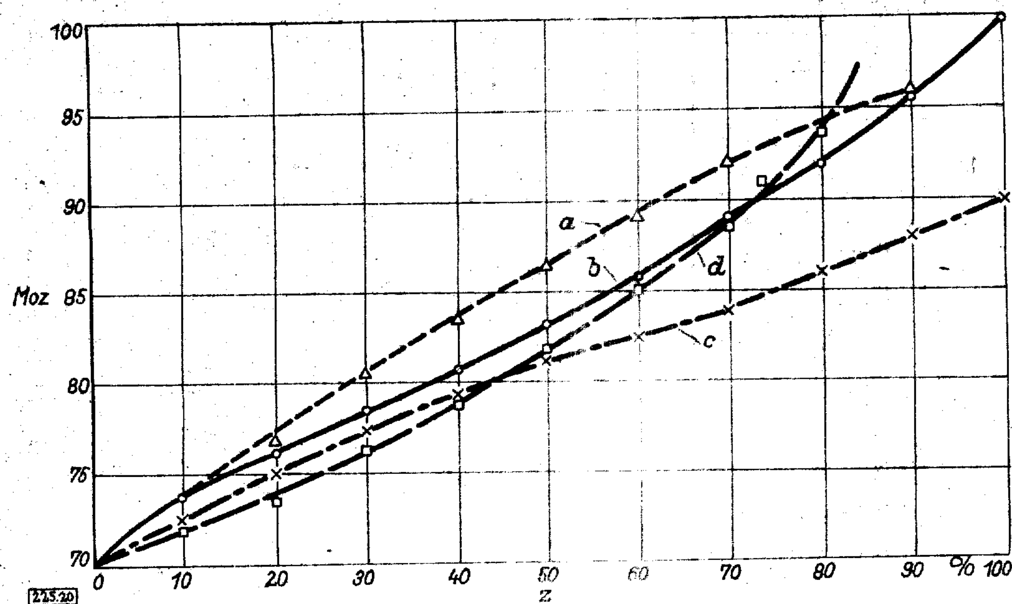


Abb. 20
Рис. 20

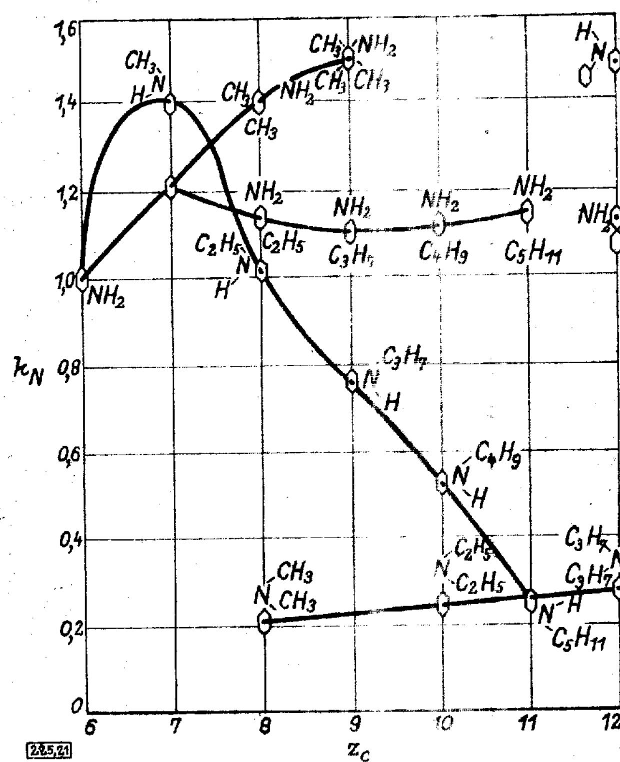


Abb. 21
Рис. 21

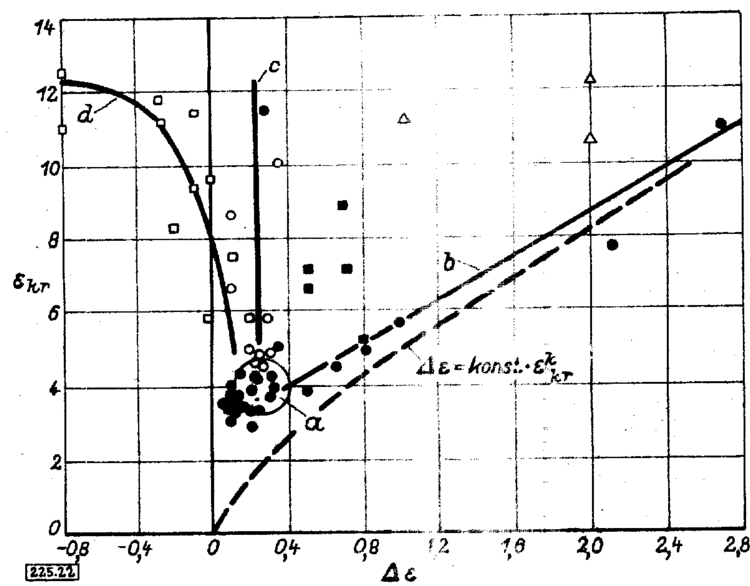


Abb. 22
Рис. 22

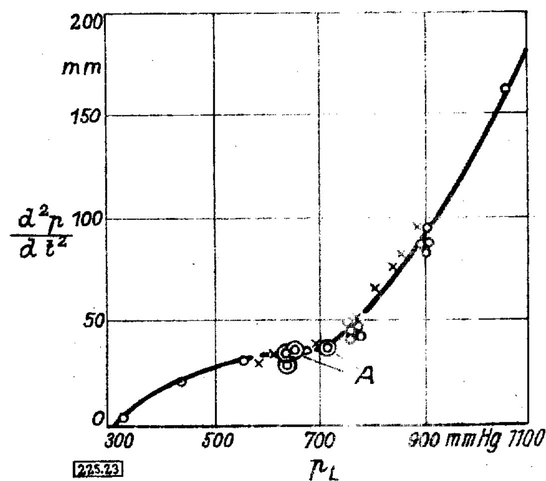


Abb. 23
Рис. 23

225/24 S.114

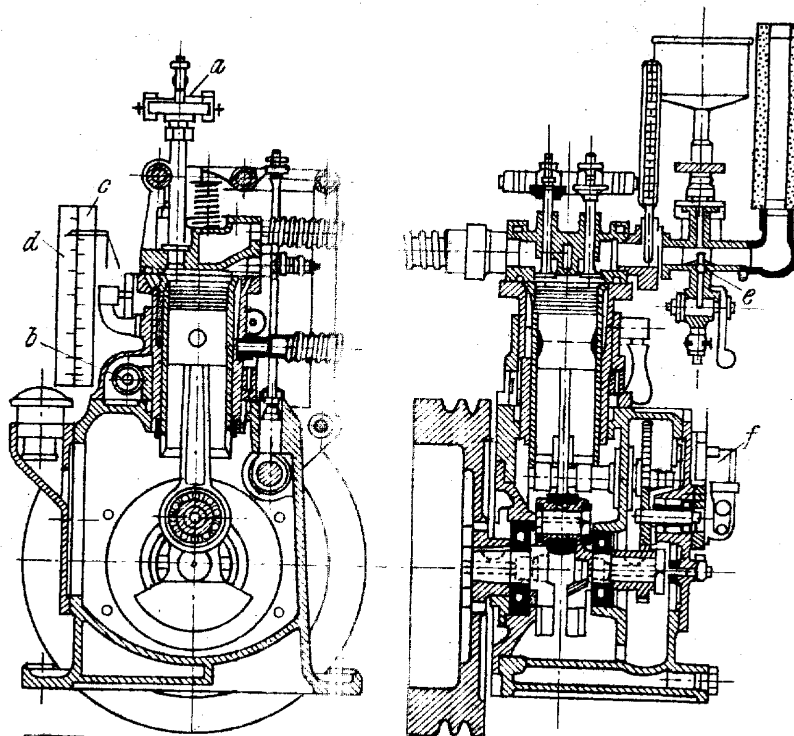
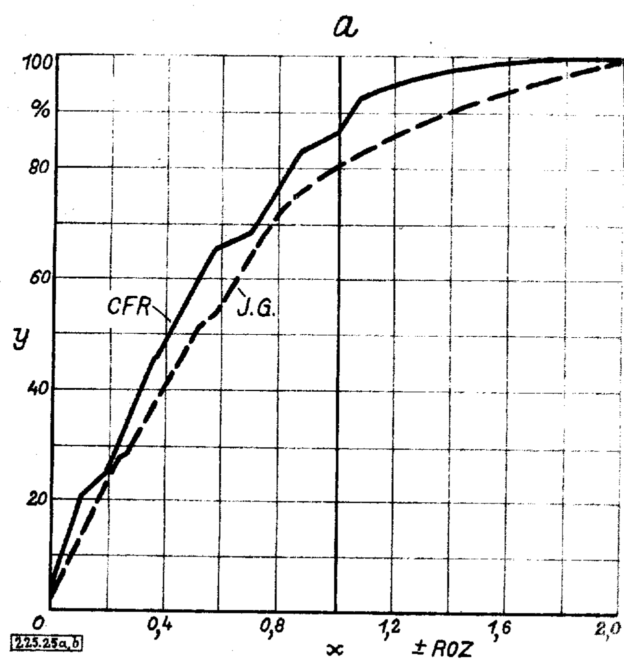


Abb. 24 Рис. 24


a
100
%
80
60
40
20
0
CFR
J.G.
y
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
x
± ROZ
225.25a,b

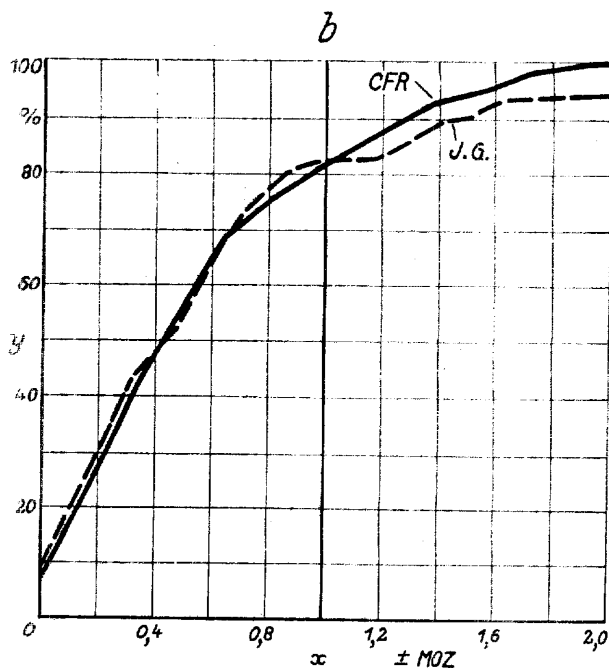

b
100
%
80
60
40
20
0
CFR
J.G.
y
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
x
± MOZ

Abb. 25
Рис. 25

225/26 S.116

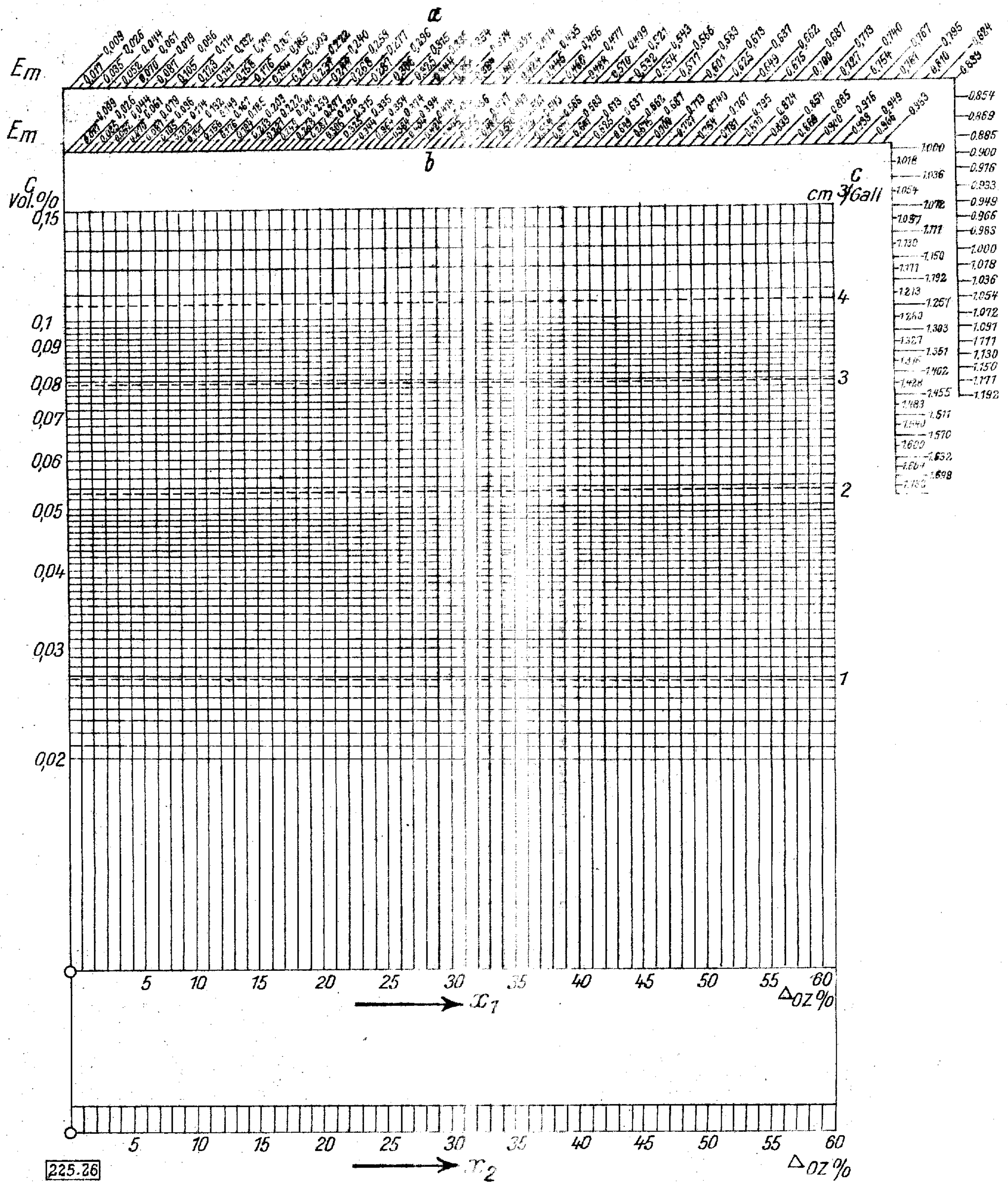


Abb.26 Рис.26

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

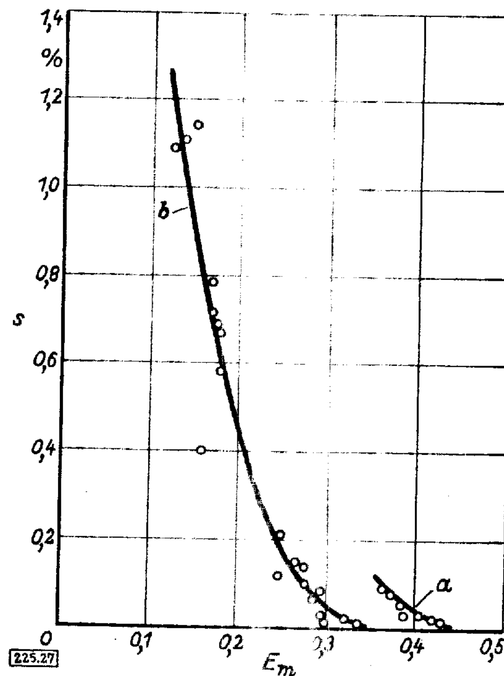


Abb. 27
Рис. 27

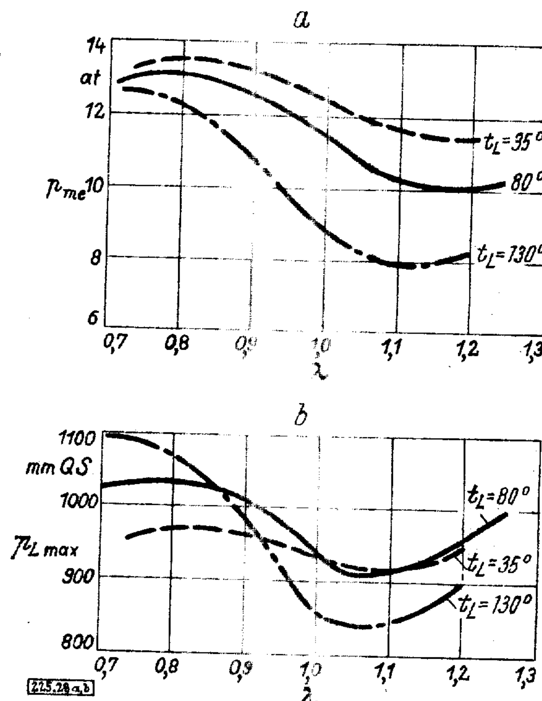
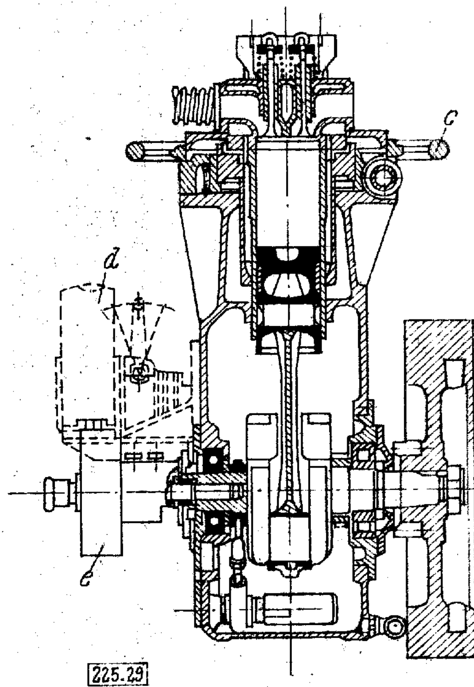


Abb. 28
Рис. 28

225/29 S.118



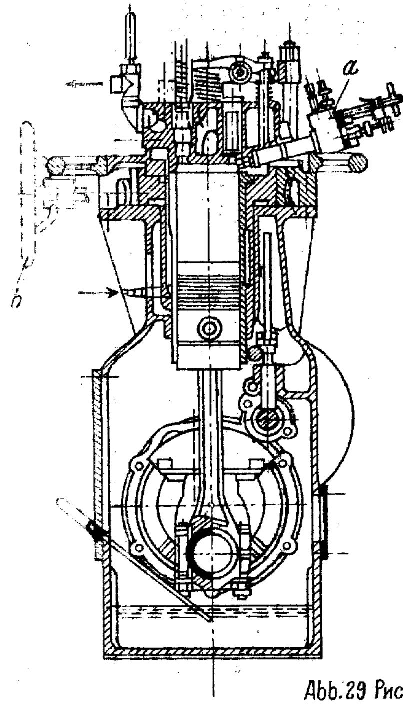
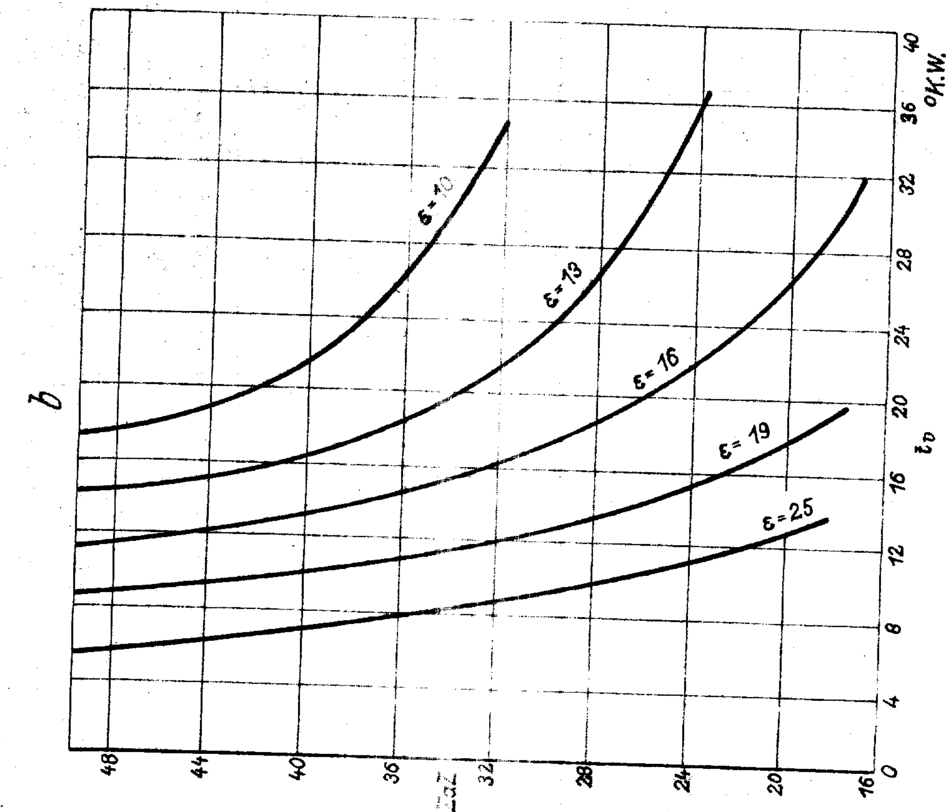


Abb.29 Рис.29


b
ε=10
ε=13
ε=16
ε=19
ε=25
°K.W.
t_v
ZaZ
0
4
8
12
16
20
24
28
32
36
40
48
44
40
36
32
28
24
20
16

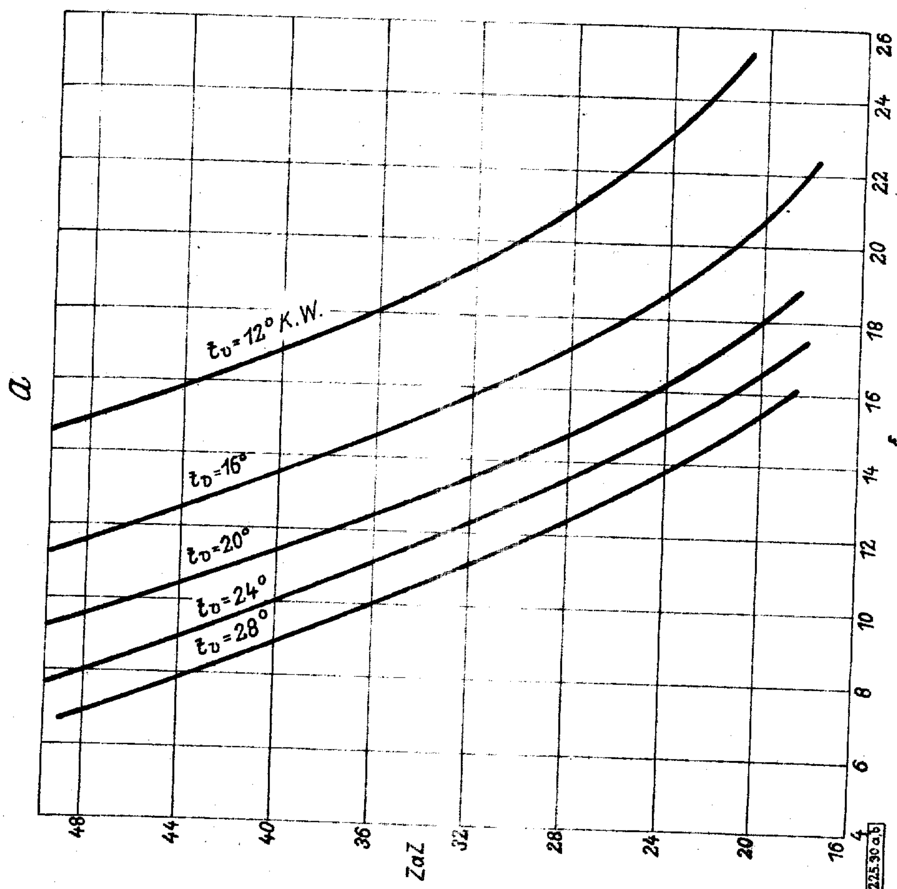

a
t_v=12° K.W.
t_v=16°
t_v=20°
t_v=24°
t_v=28°
ε
ZaZ
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
48
44
40
36
32
28
24
20
16
225.30 a,b

Abb. 30 Рис. 30

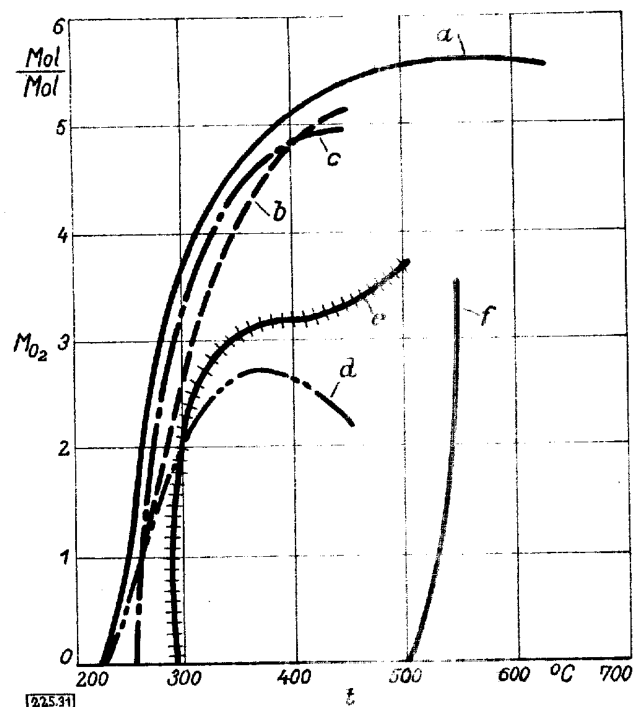


Abb. 31
Рис. 31

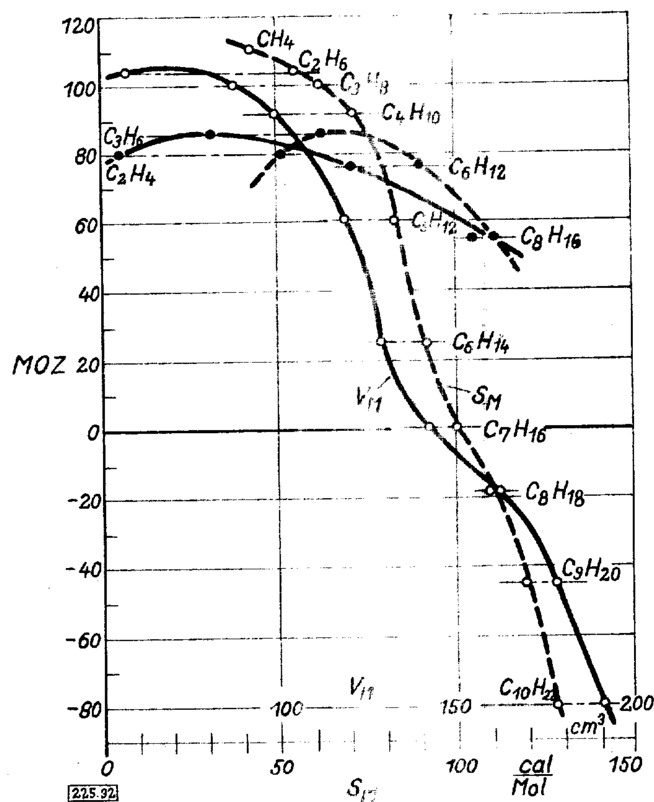
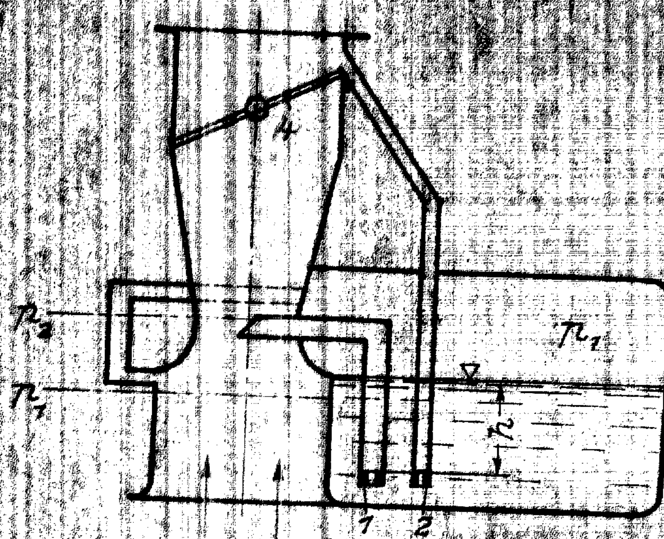


Abb. 32
Рис. 32



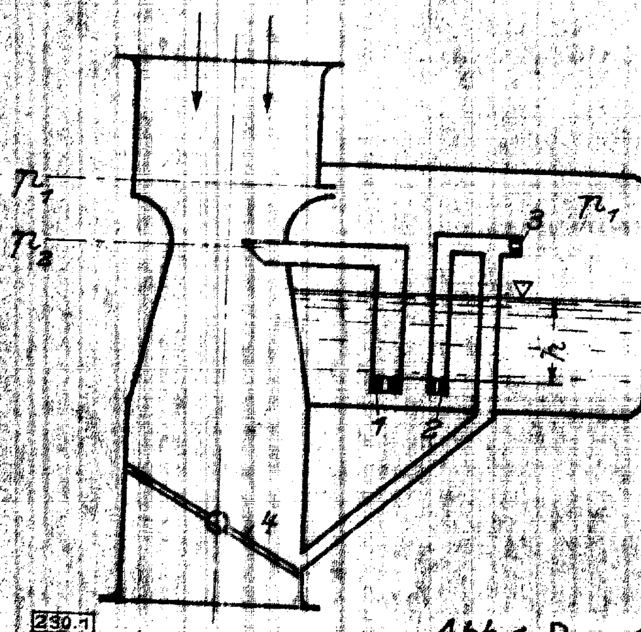


Abb.1 Рис.1

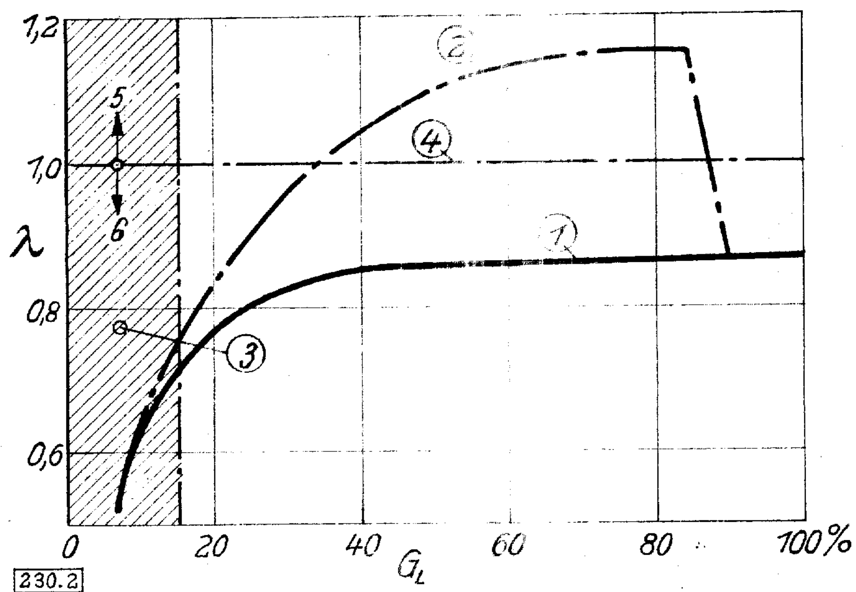


Abb.2 Рис.2

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

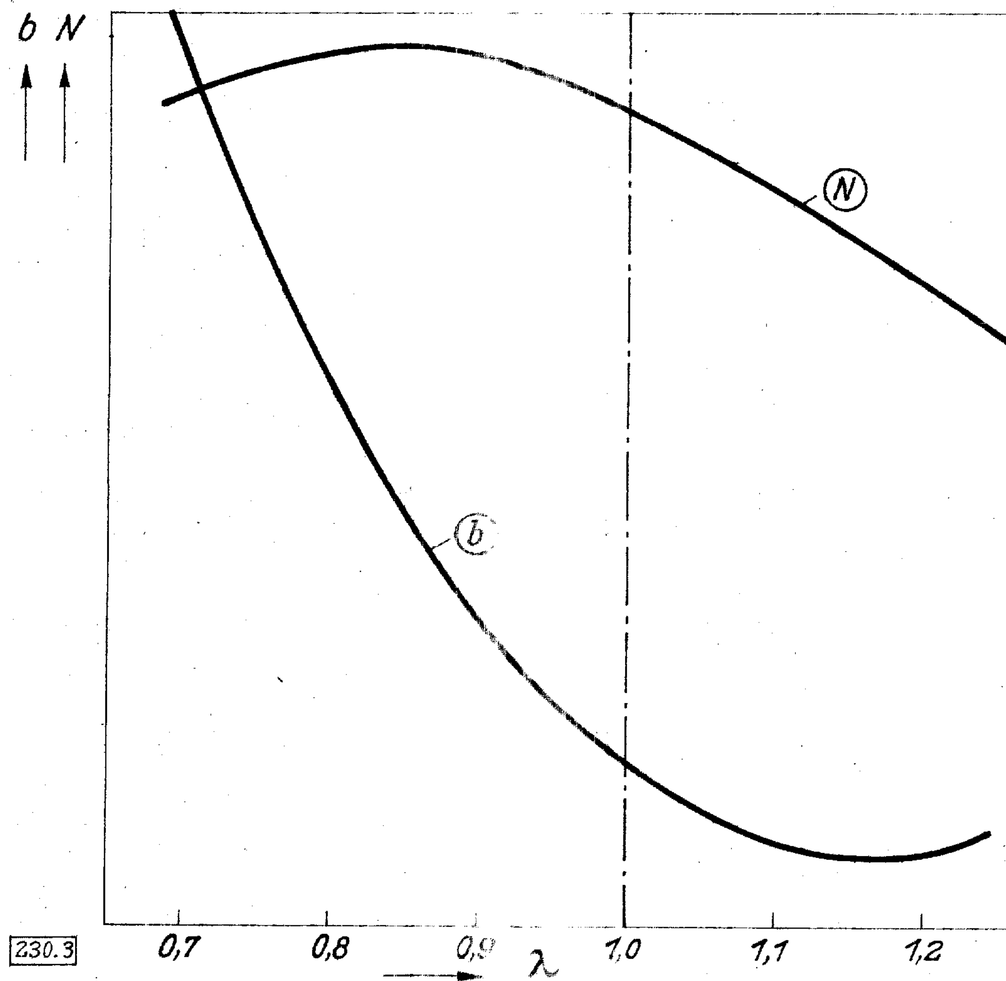


Abb.3 Рис.3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

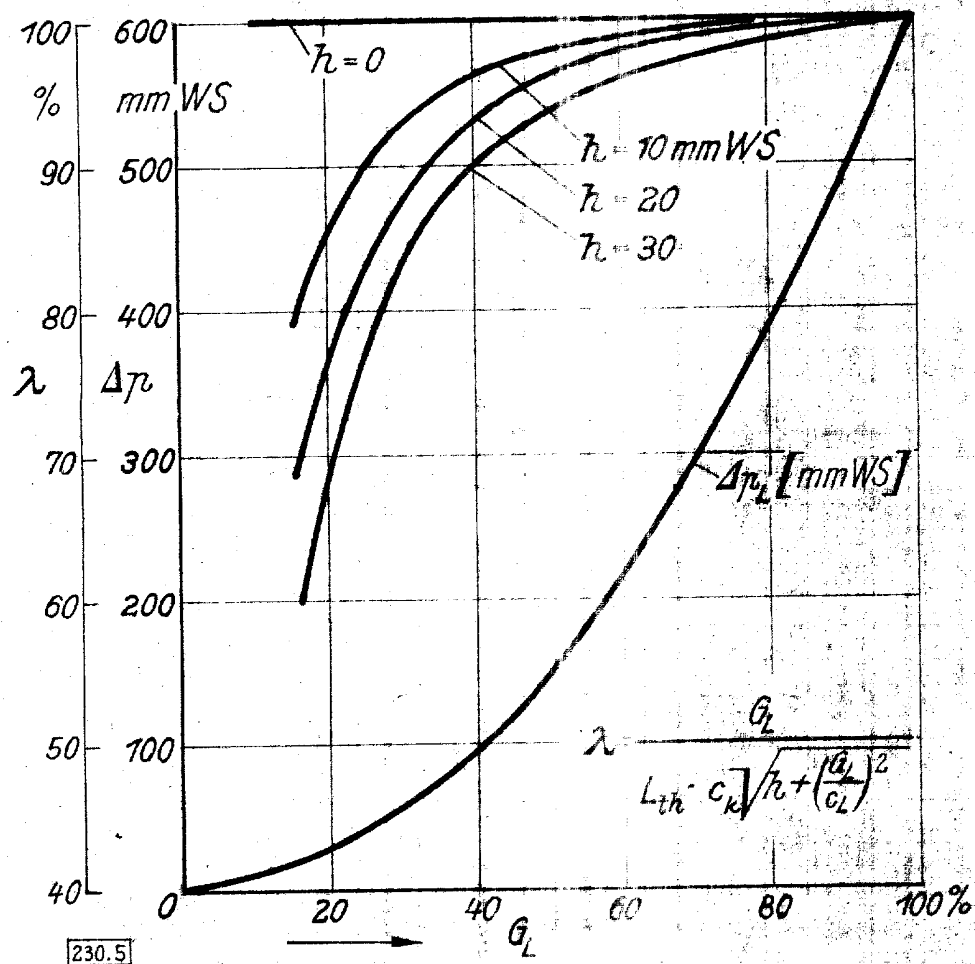

100
600
%
mm WS
90
500
80
400
λ
Δp
70
300
60
200
50
100
40
0
20
40
60
80
100%
G_L
h = 0
h = 10 mm WS
h = 20
h = 30
Δp_L [mm WS]
$\lambda = \frac{G_L}{L_{th} \cdot c_k \sqrt{h + \left(\frac{G_L}{c_L}\right)^2}}$
230.5

Abb. 5 Рис. 5

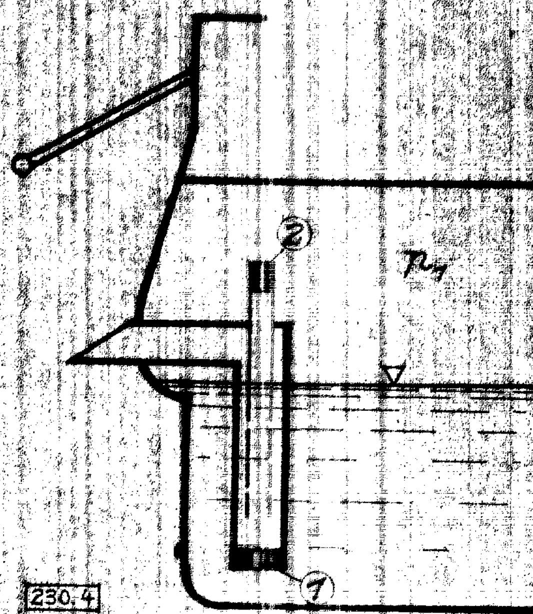


Abb.4 Рис. 4

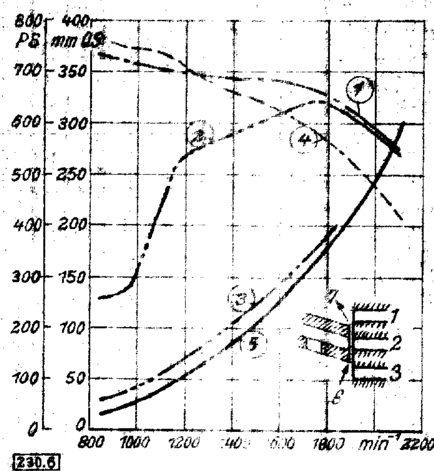


Abb.6 Рис.6

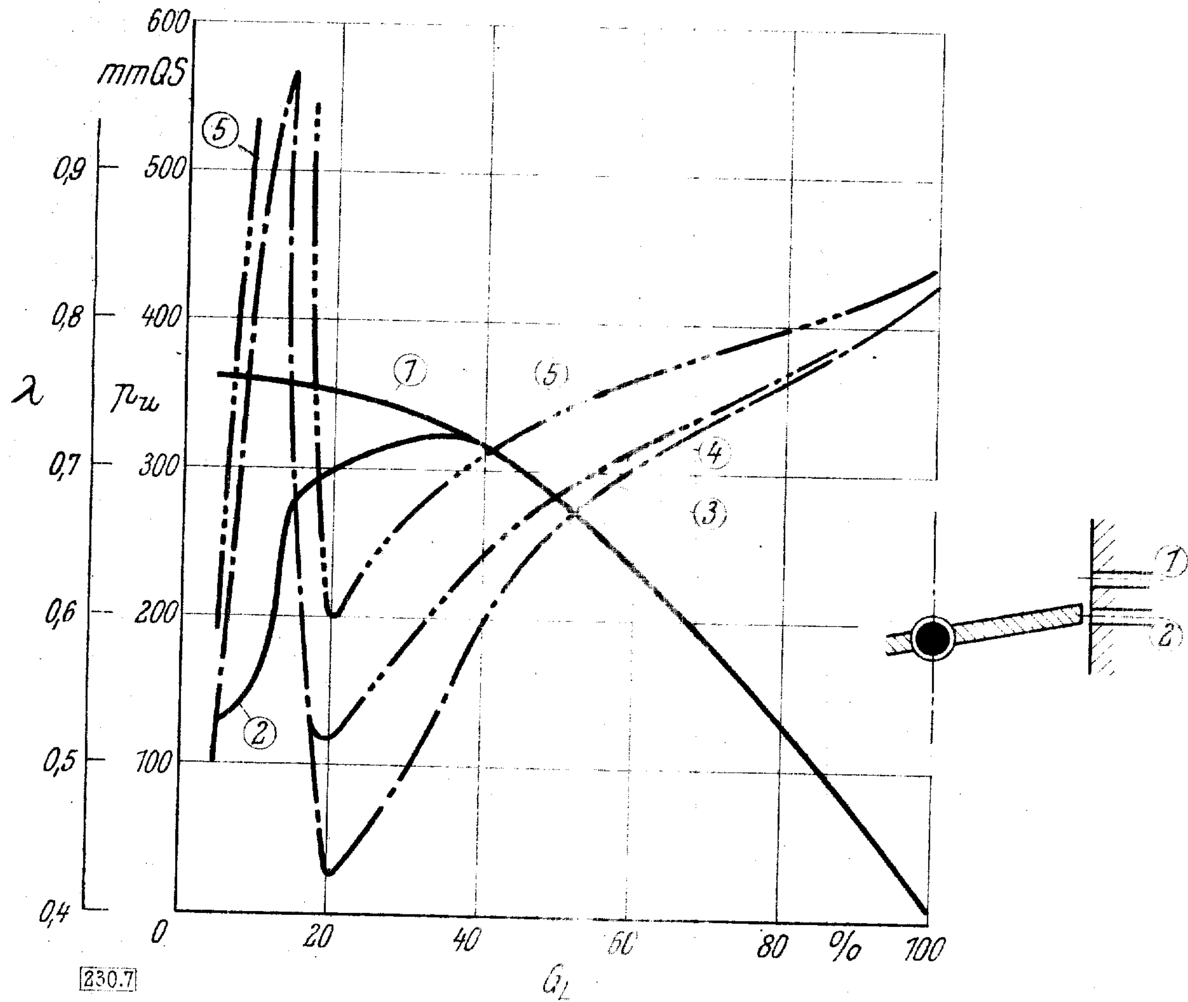


Abb. 7
Рис. 7

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

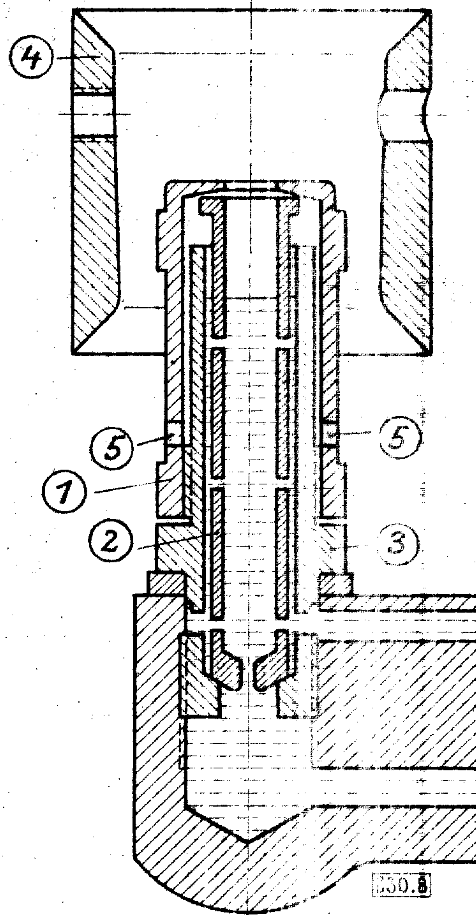


Abb.8
Рис.8

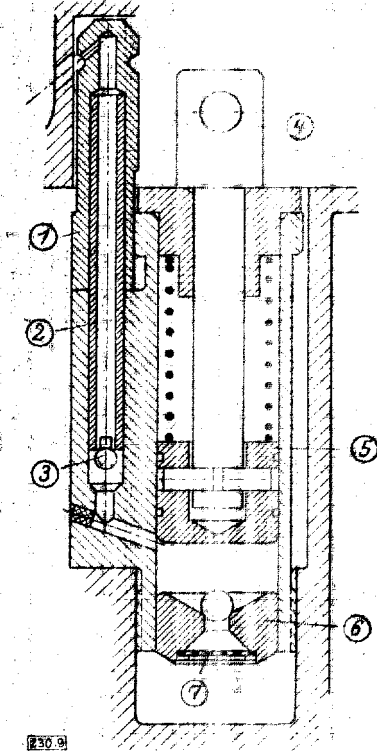


Abb.9 Рис.9

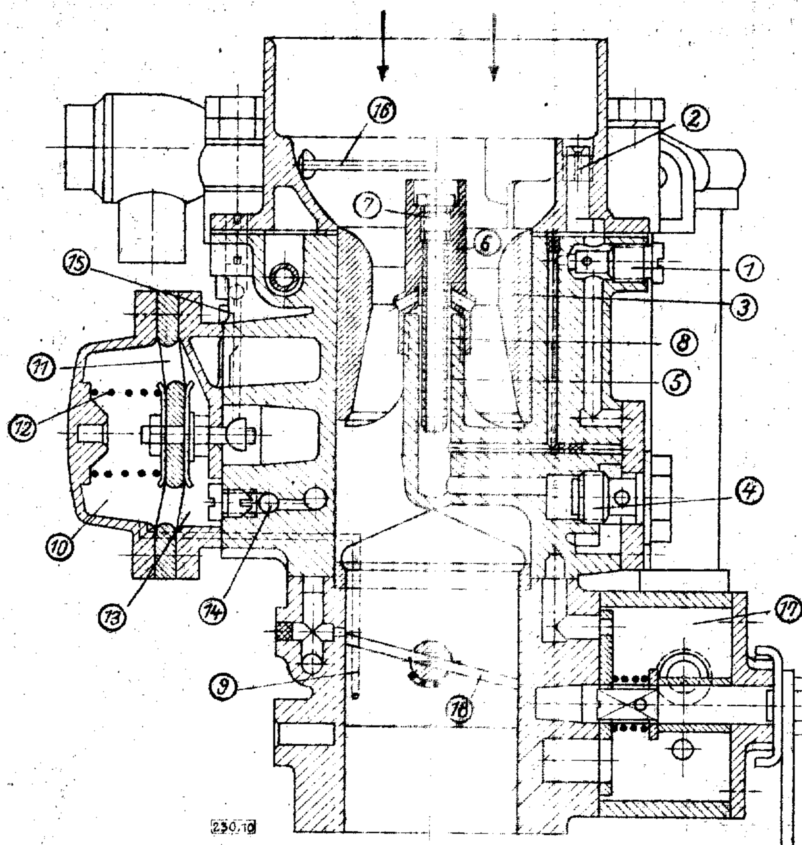


Abb.10 Рис.10

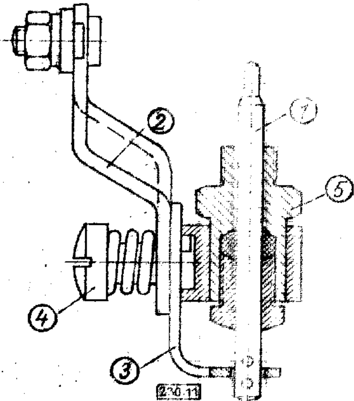


Abb. 11 Рис. 11

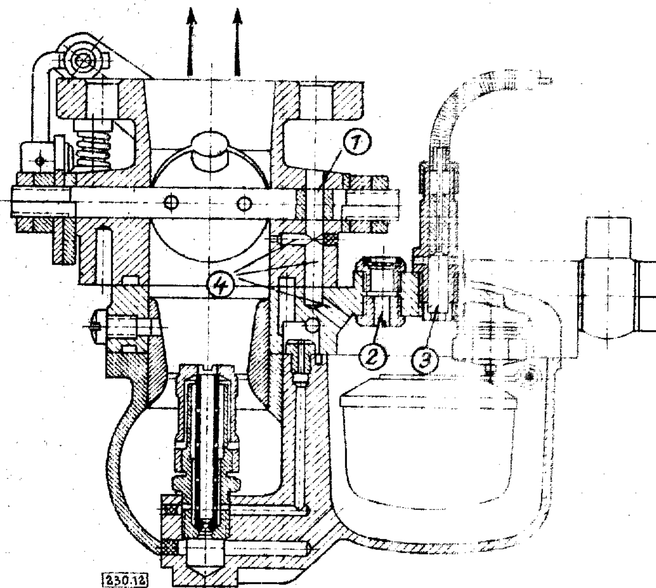


Abb. 12 Рис. 12

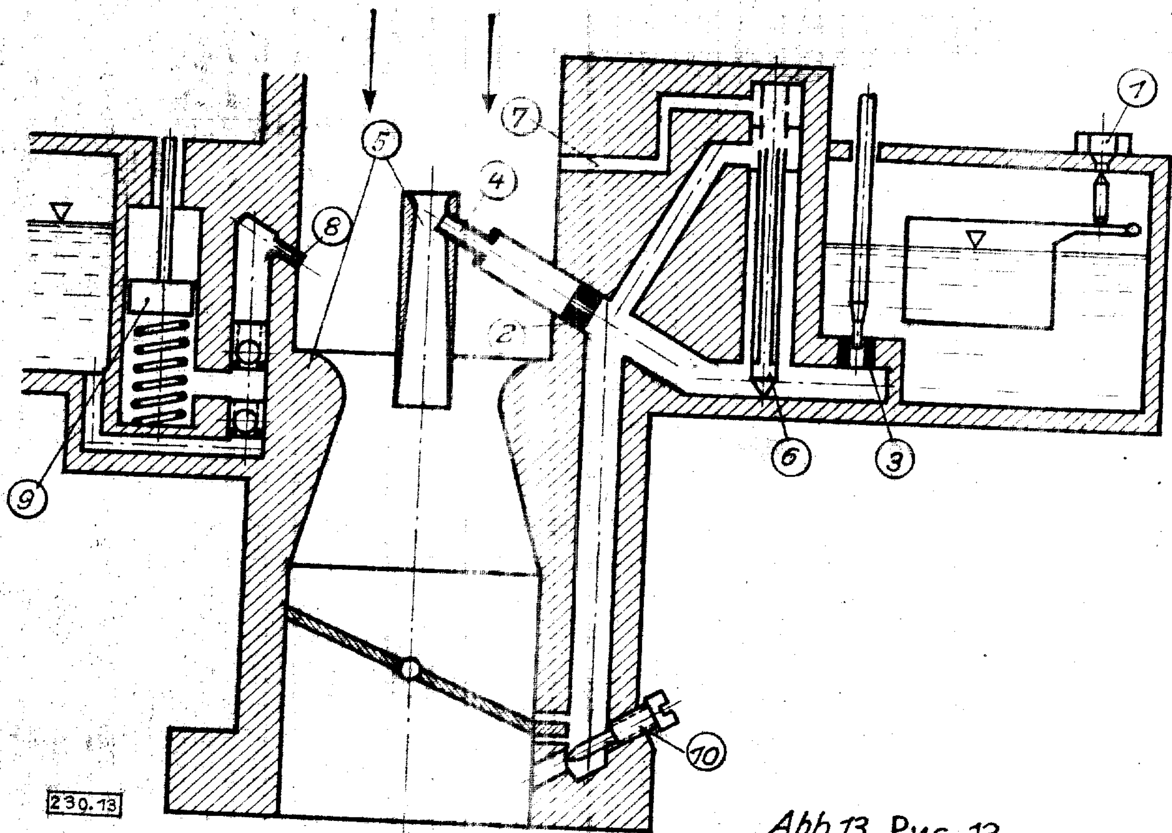


Abb.13 Рис. 13

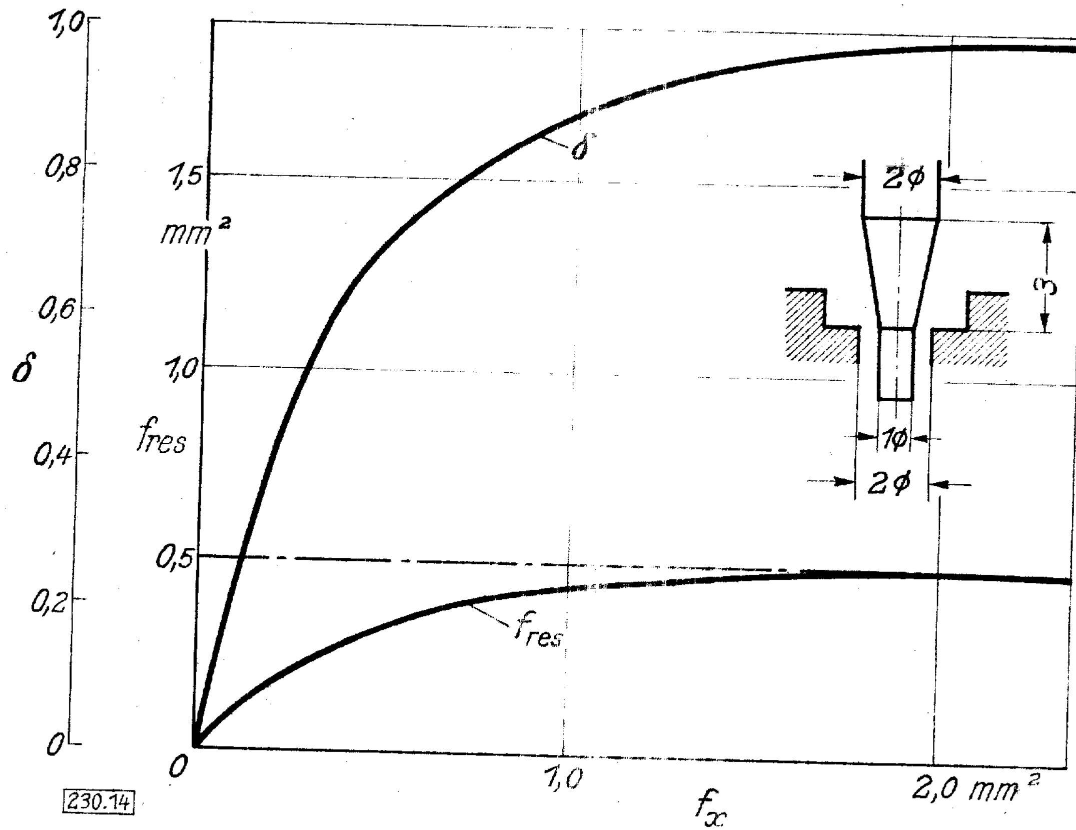

1,0
0,8
0,6
δ
0,4
0,2
0
1,5
mm²
1,0
fres
0,5
0
δ
fres
2φ
3
1φ
2φ
1,0
fx
2,0 mm²
230.14

Abb. 14 Рис. 14

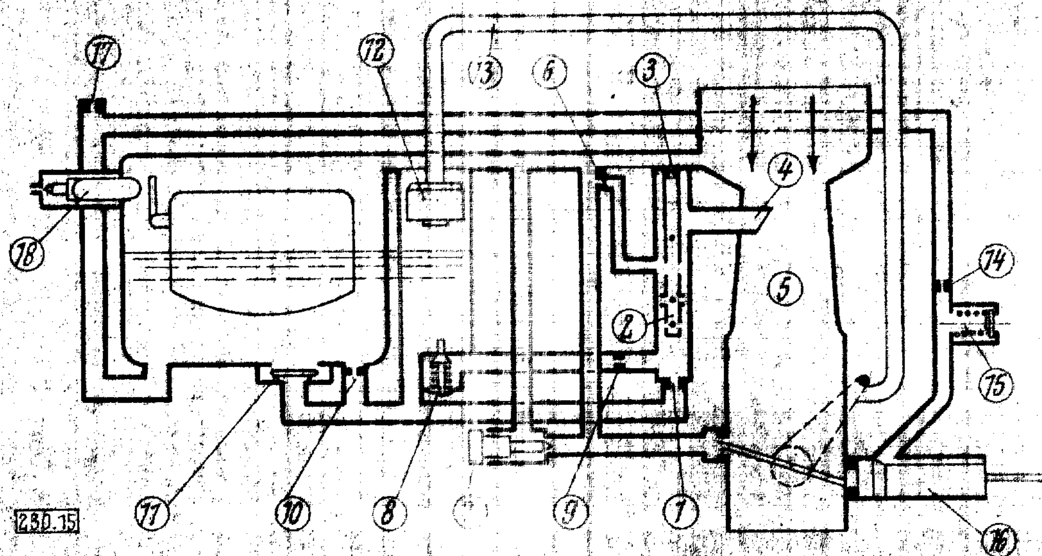
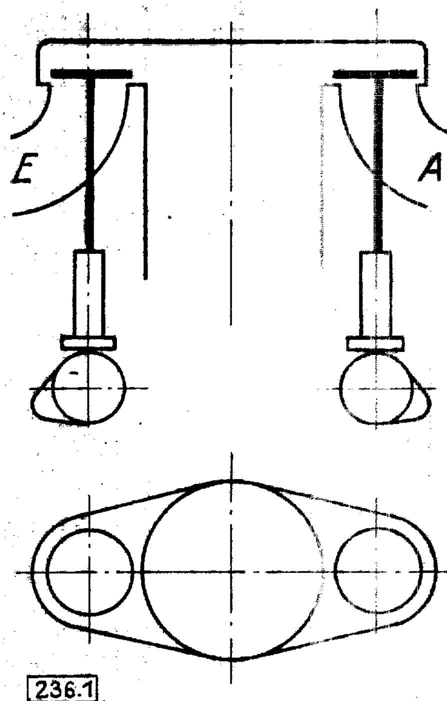
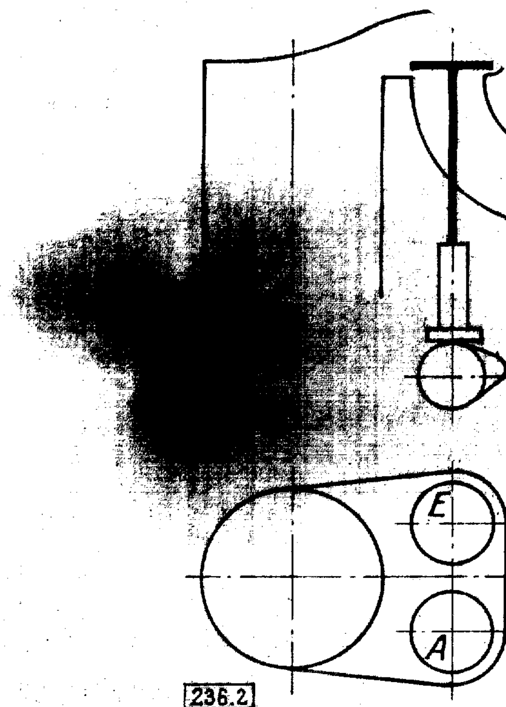
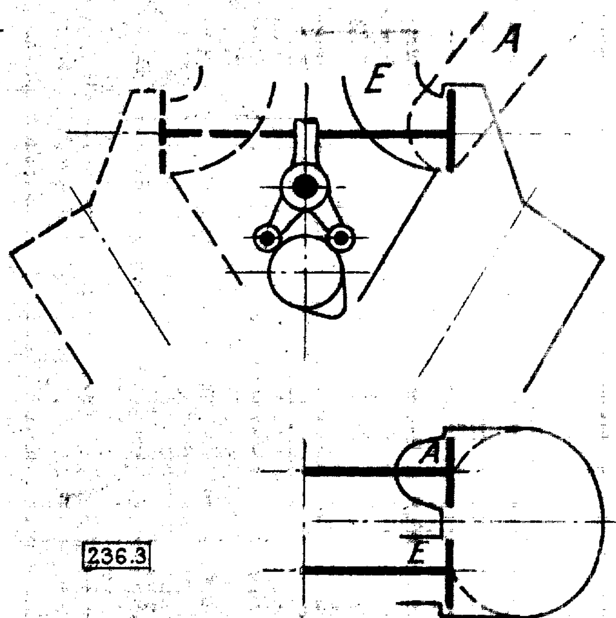
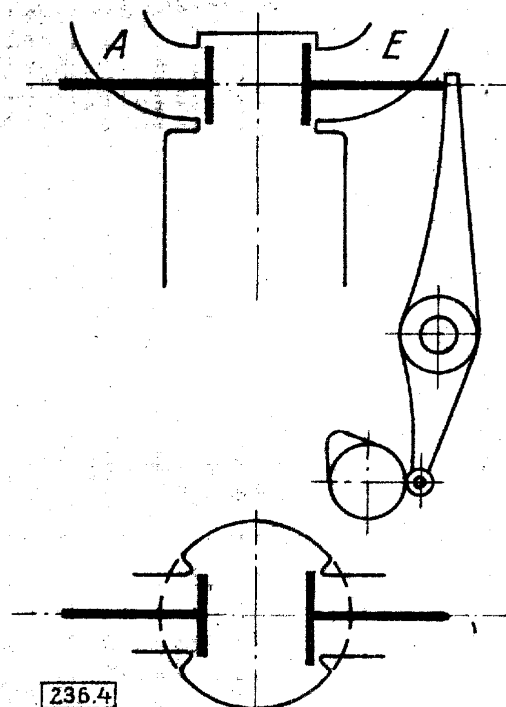


Abb. 15
Рис. 15



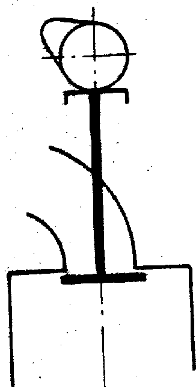


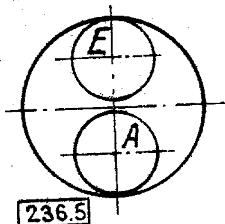


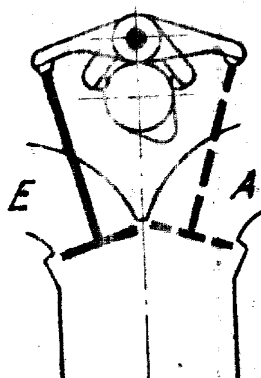


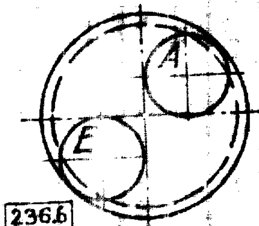
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

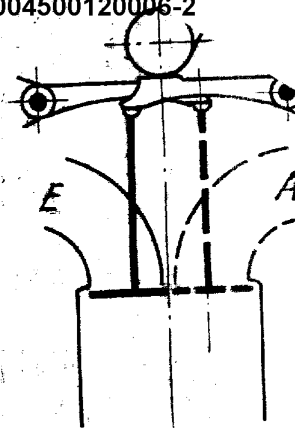
Abb. 1÷4 Рис. 1÷4

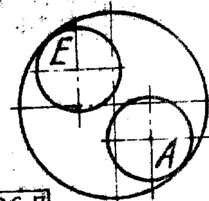


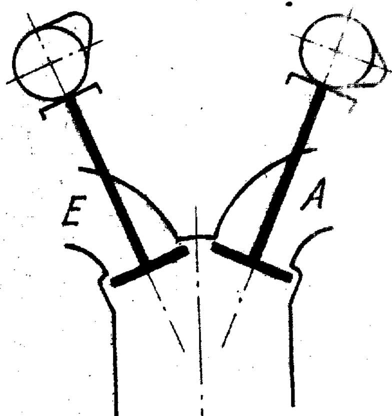


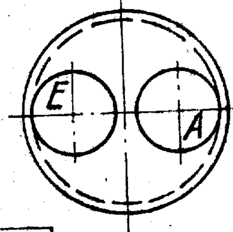




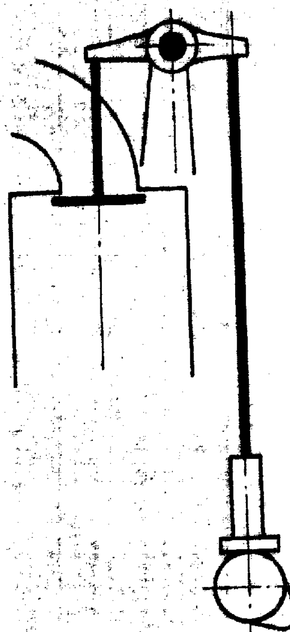


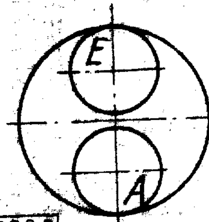






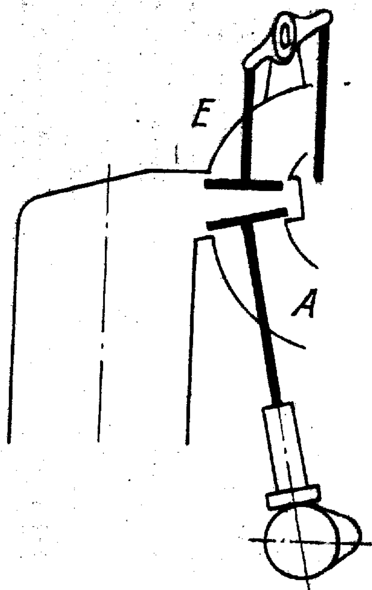
236.8

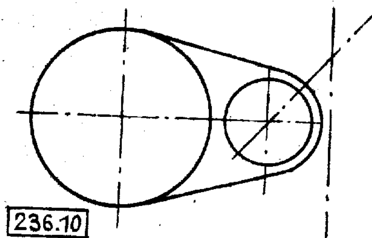


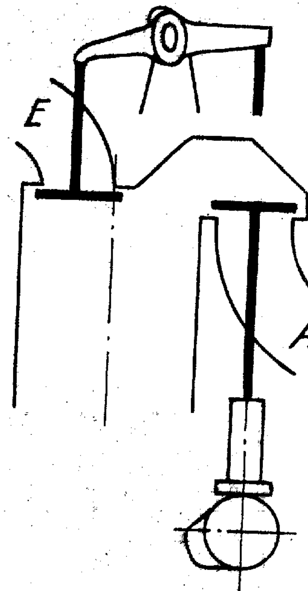


236.9

Abb. 5÷9 Рис. 5÷9







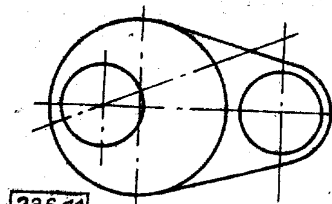
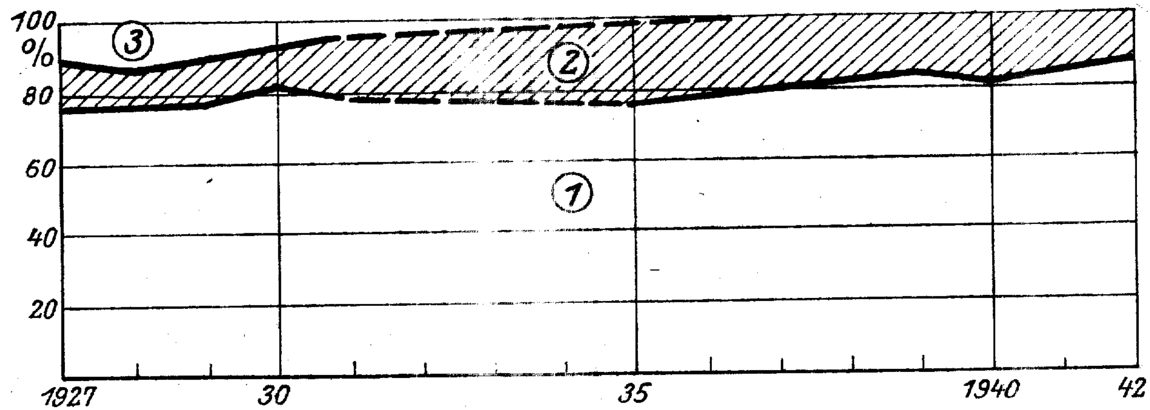
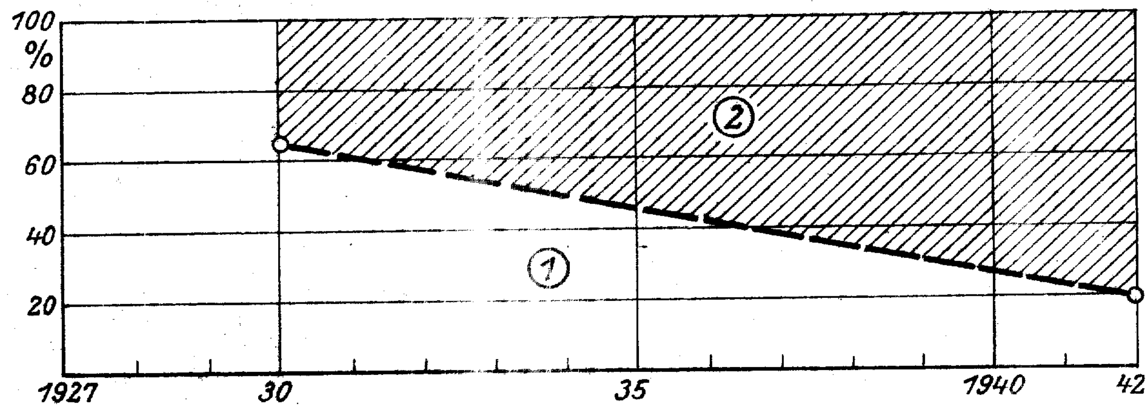


Abb.10÷11 Рис.10÷11

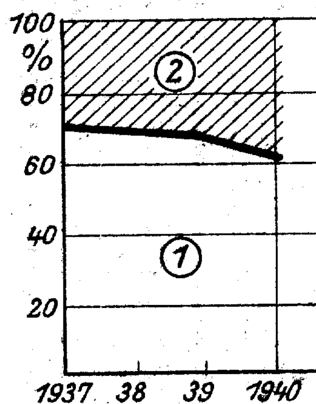
I

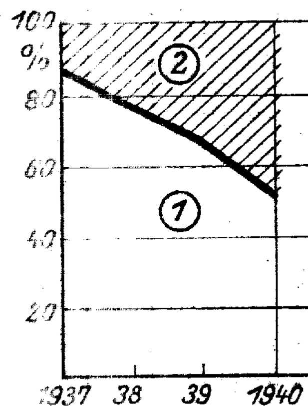


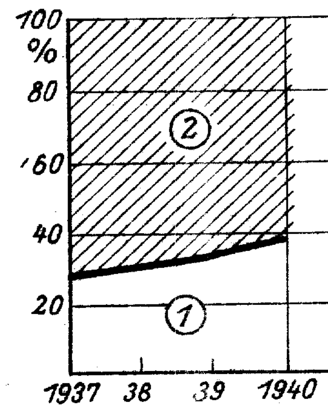
II



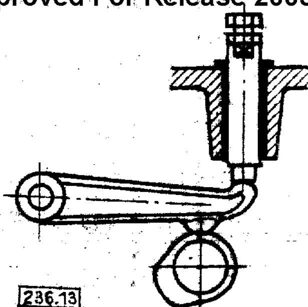
III

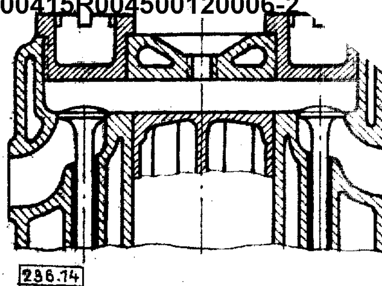


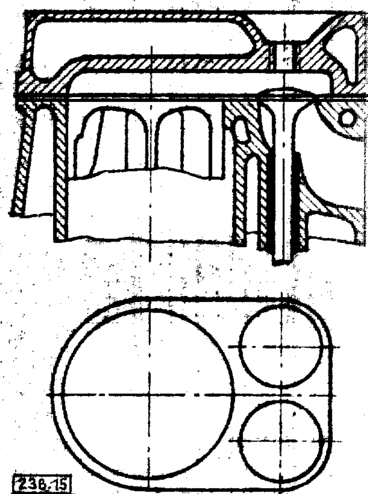


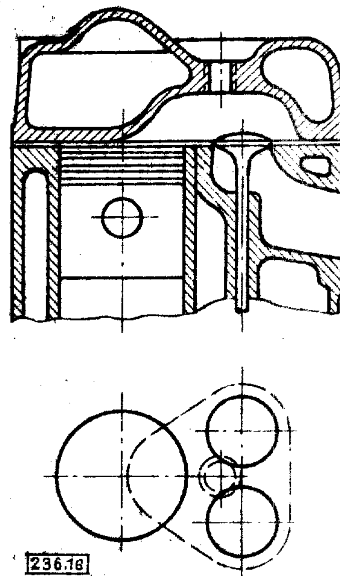


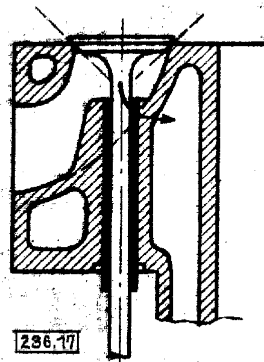
236.12











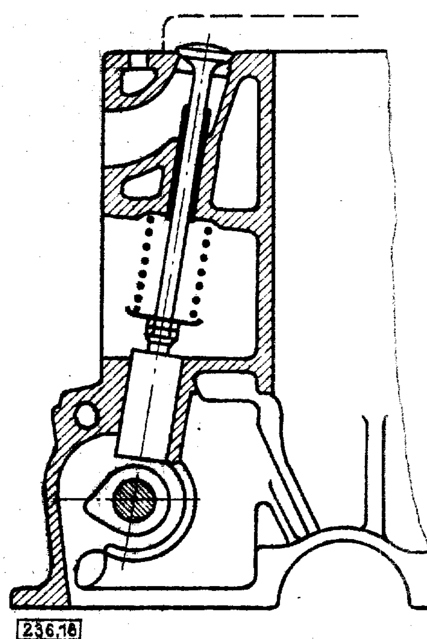
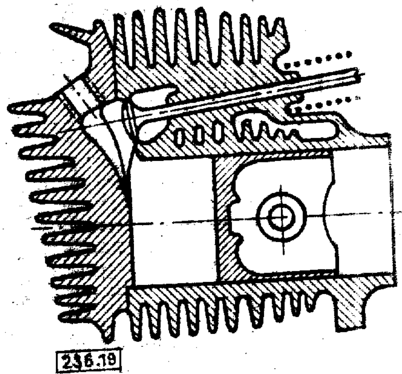
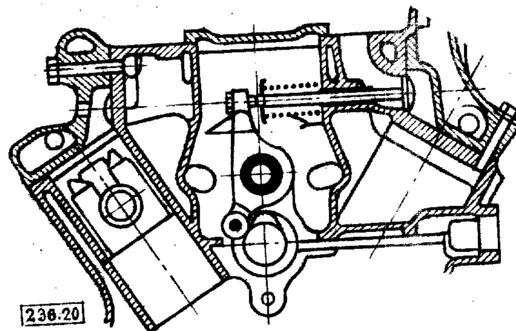
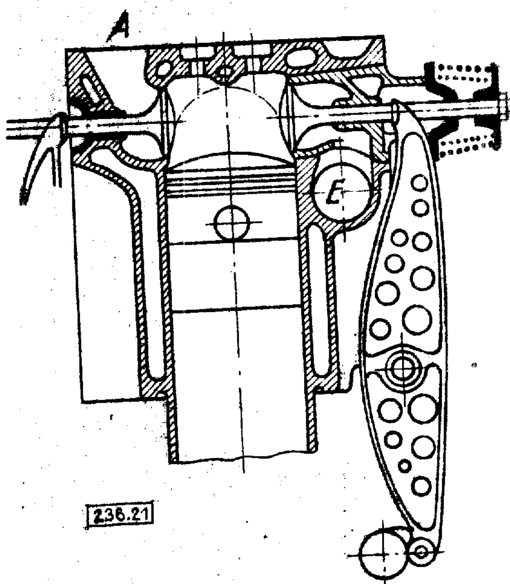


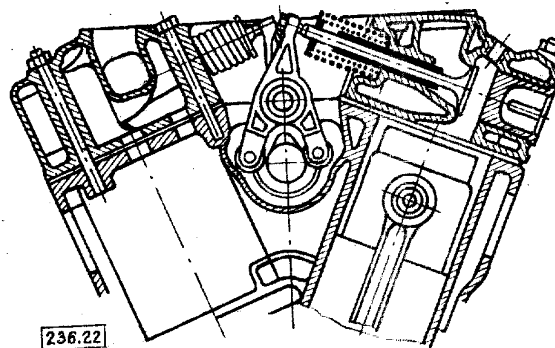
Abb. 13÷18 Рис. 13÷18

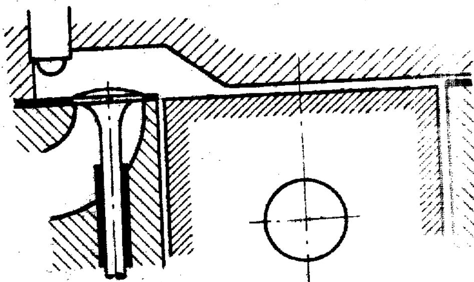

236.19

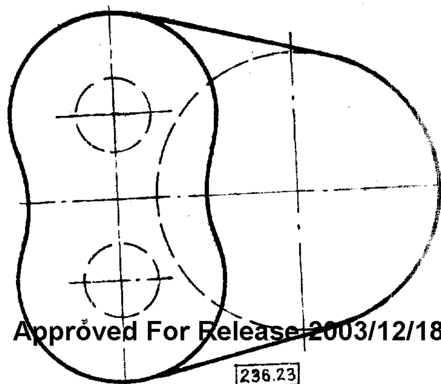

236.20



236.21


236.22




236.23

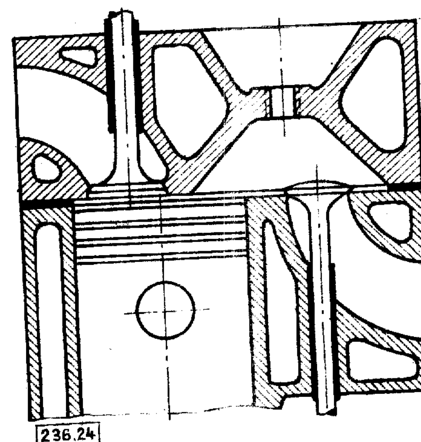
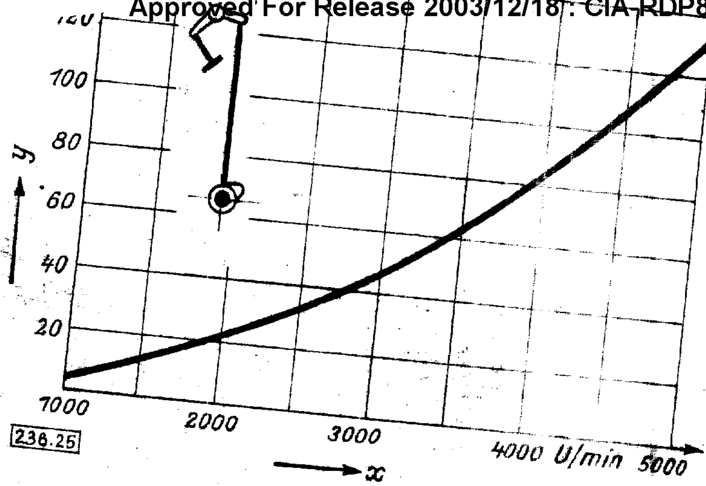
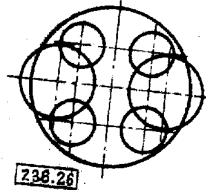

236.24

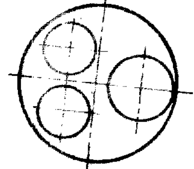
Abb. 19÷24 Рис. 19÷24

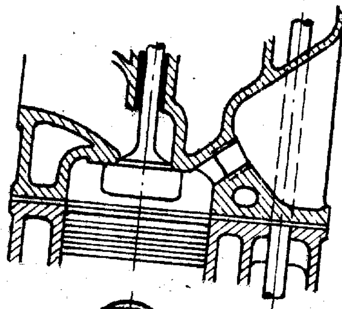


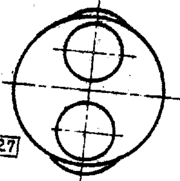
236.25



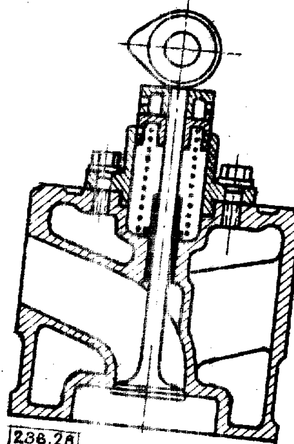
236.26



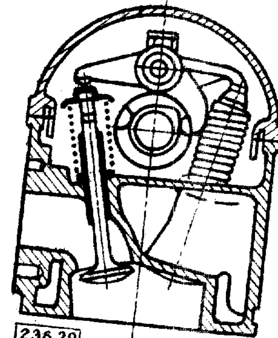




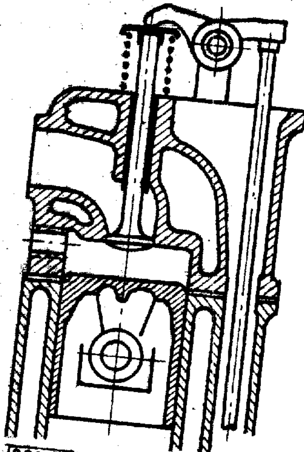
236.27



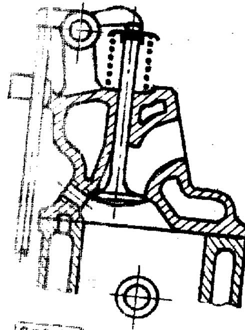
236.28



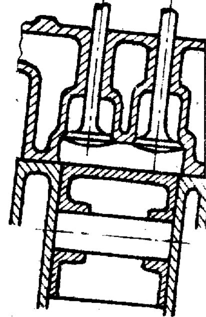
236.29



236.30

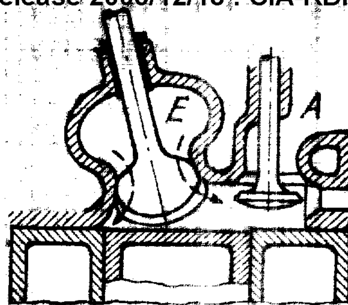


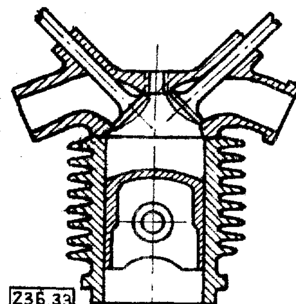
236.31

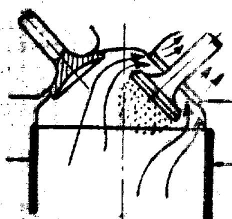


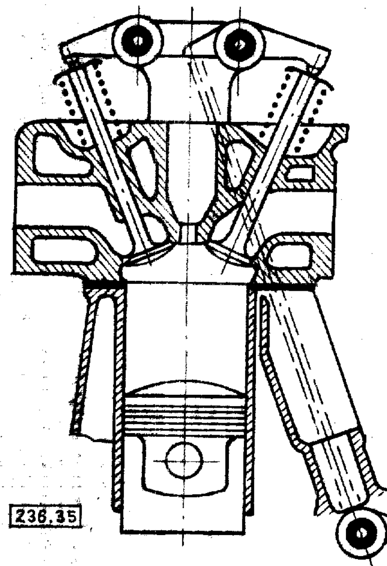
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

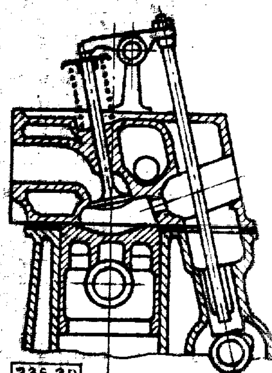
Abb.25÷31 Рис.25÷31











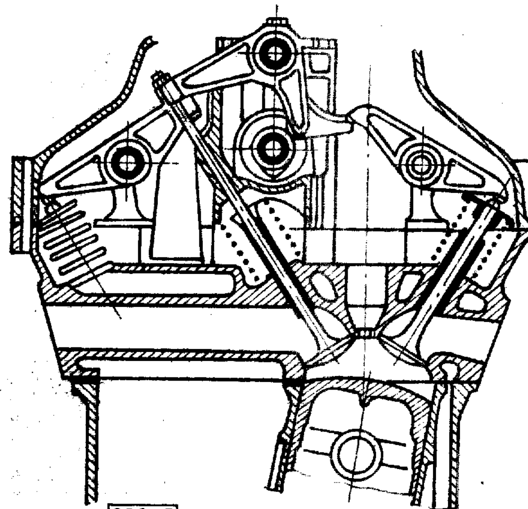
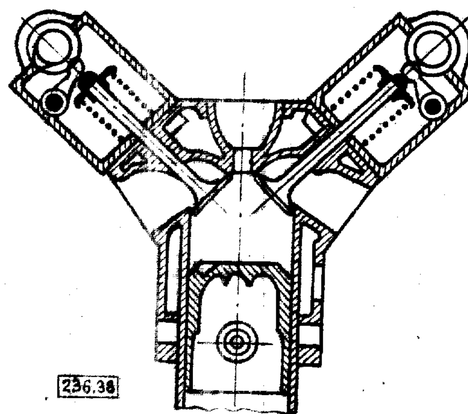


Abb.32÷37 Рис.32÷37



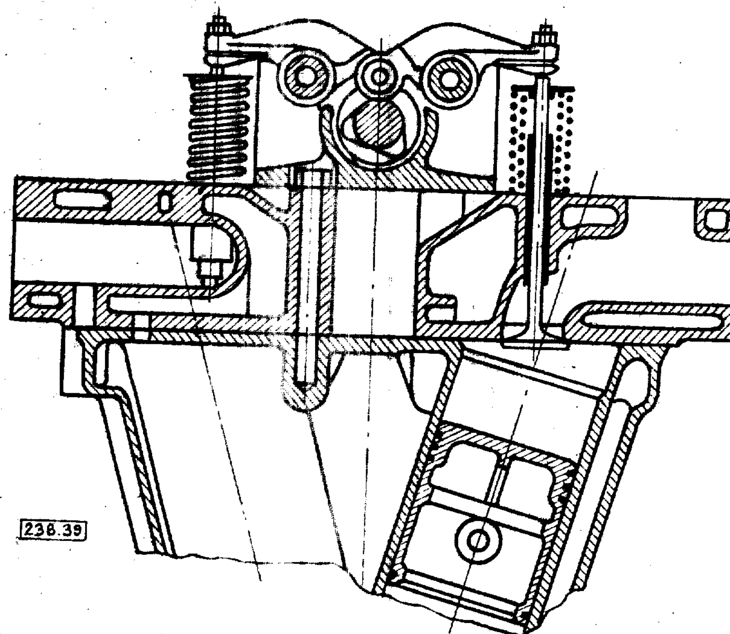


Abb. 38 u. 39 Рис. 38 и 39

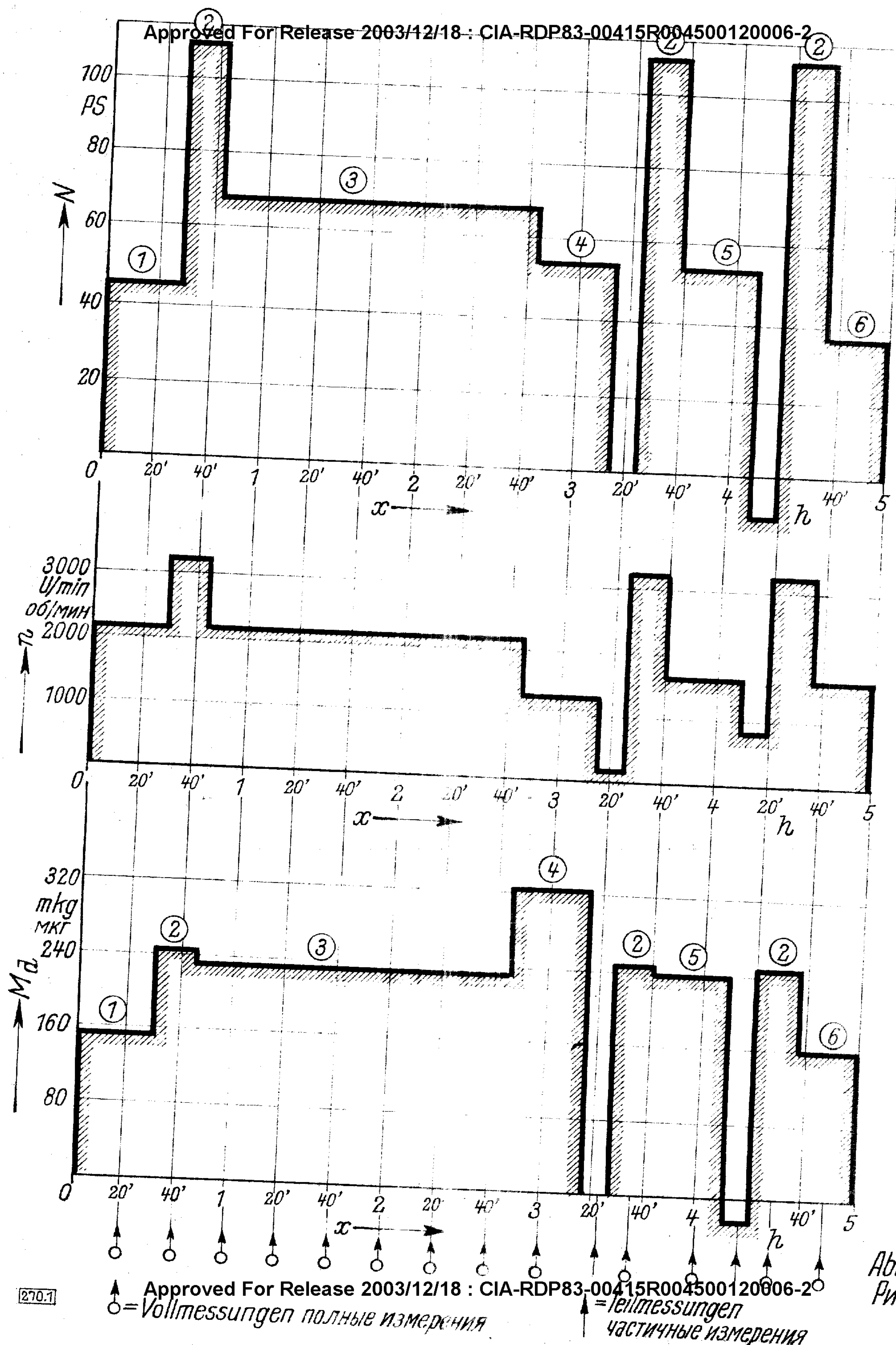


Abb.1
Рис.1

270.1

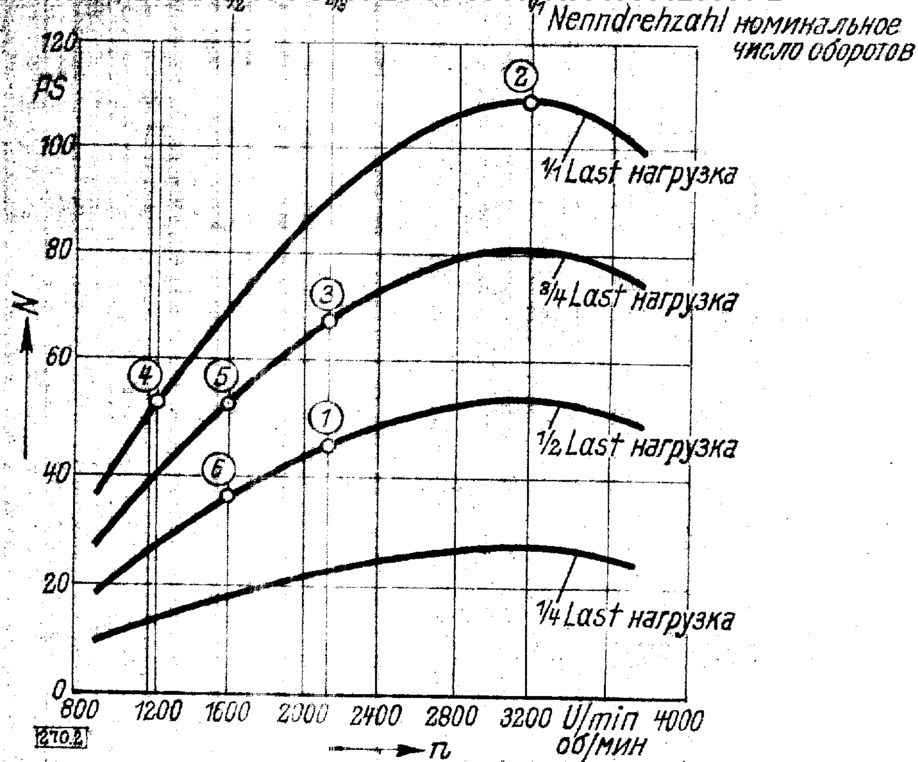


Abb.2 Рис.2

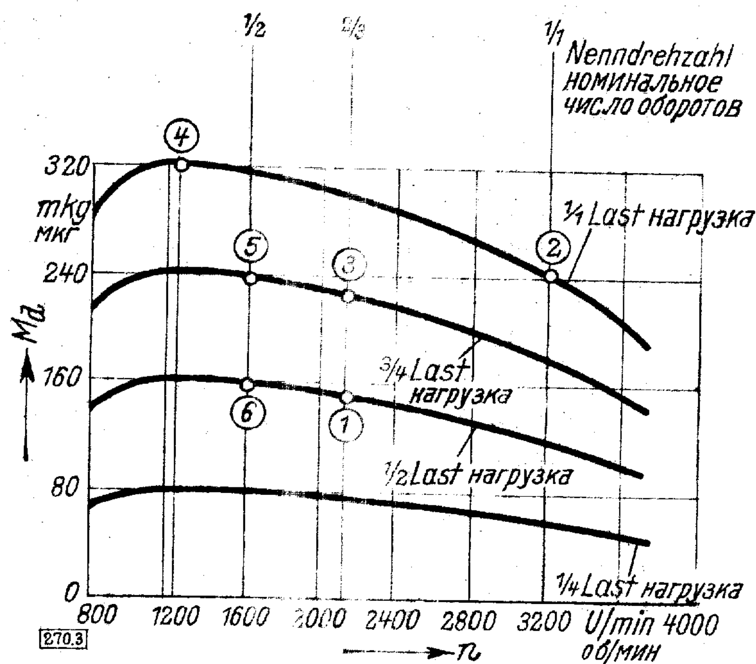
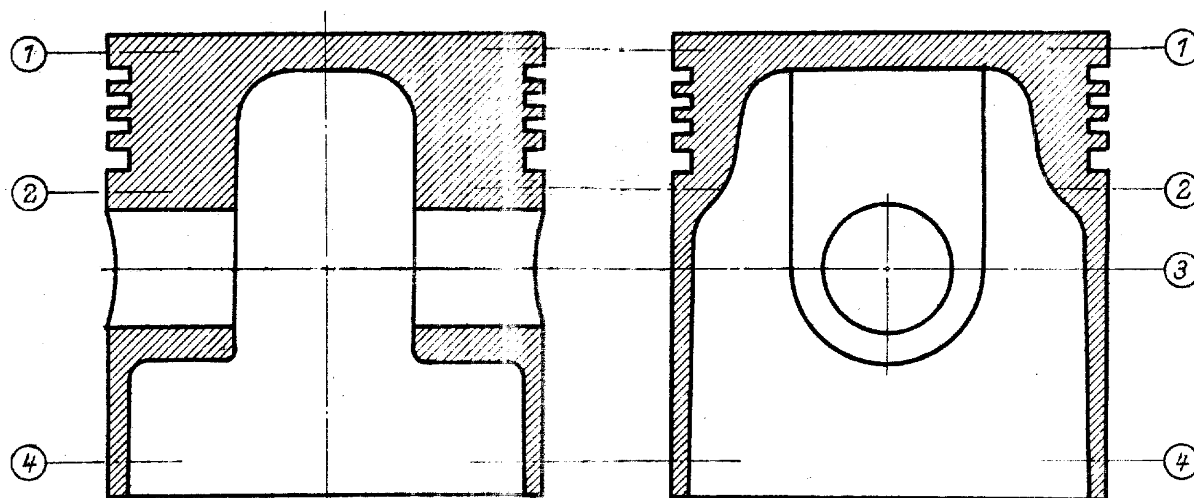


Abb.3 Рис.3



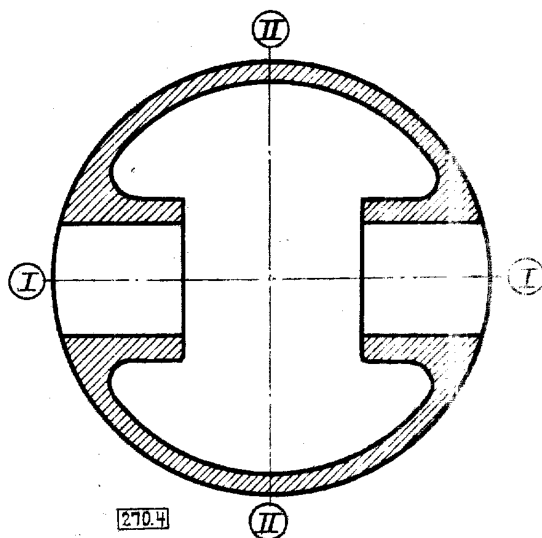


Abb.4 Рис.4

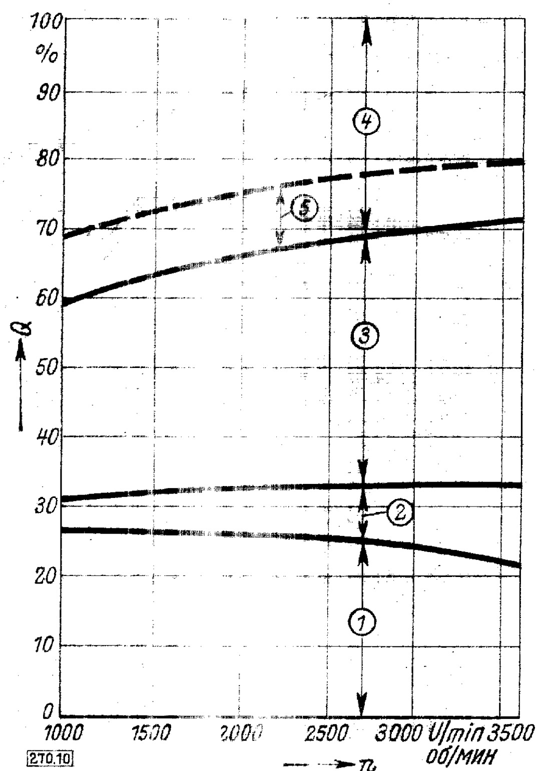


Abb.10 Рис.10

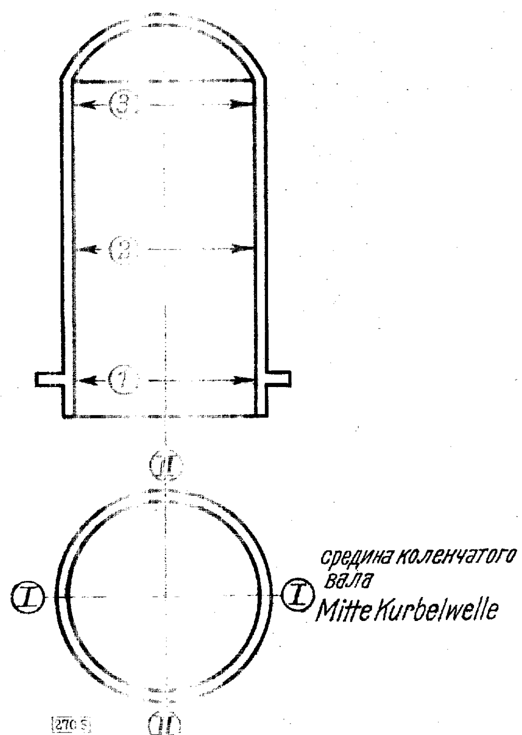


Abb.5 Рис.5

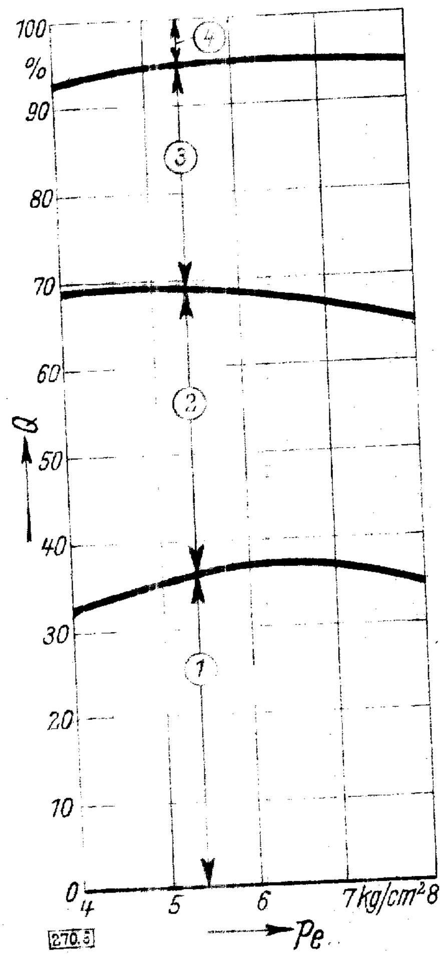


Abb.6 Рис.6

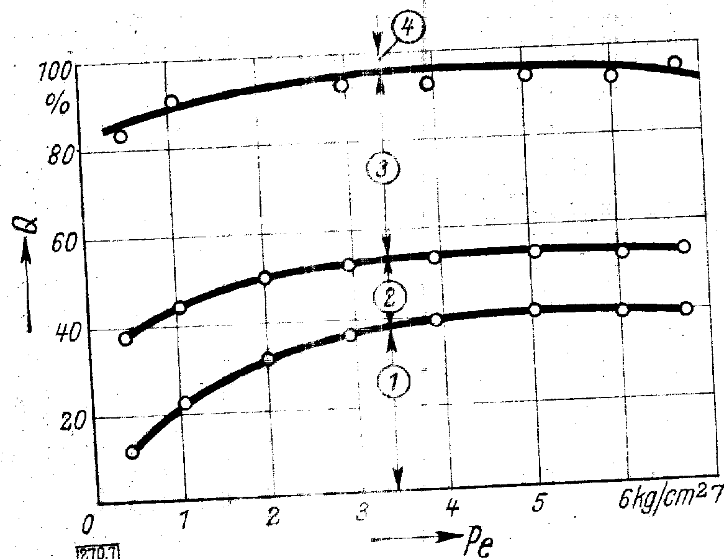


Abb.7 Рис.7

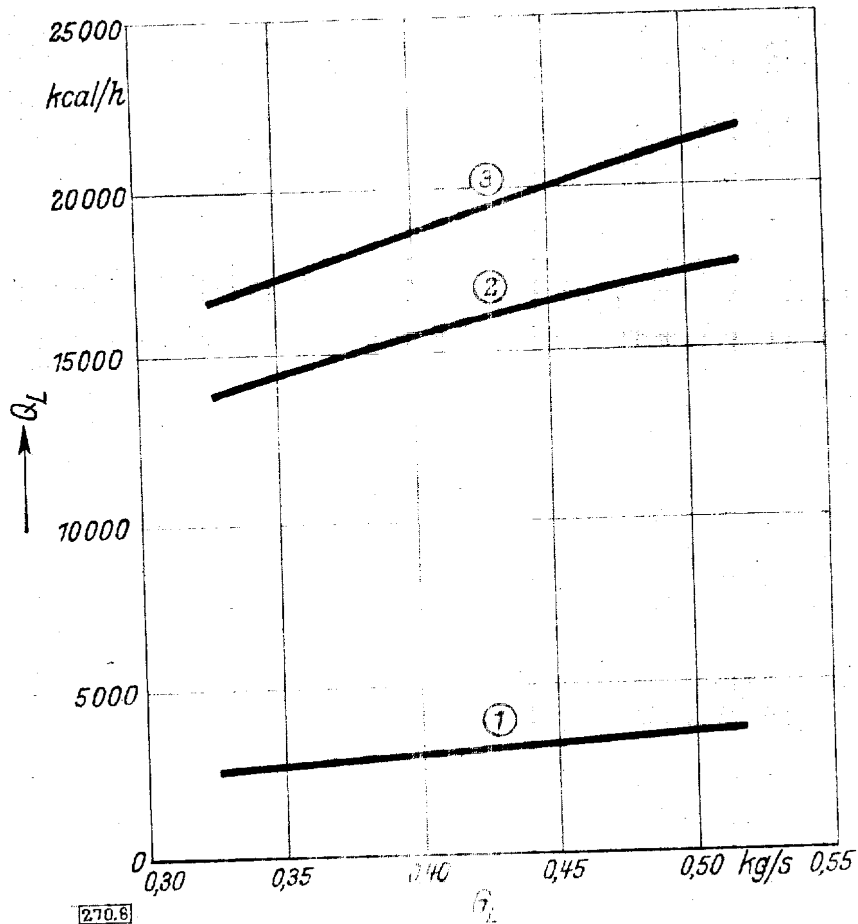

25000
kcal/h
20000
15000
10000
5000
0
Q_L
3
2
1
0,30
0,35
0,40
0,45
0,50
kg/s
0,55
G_L
270.8

Abb.8 Рис.8

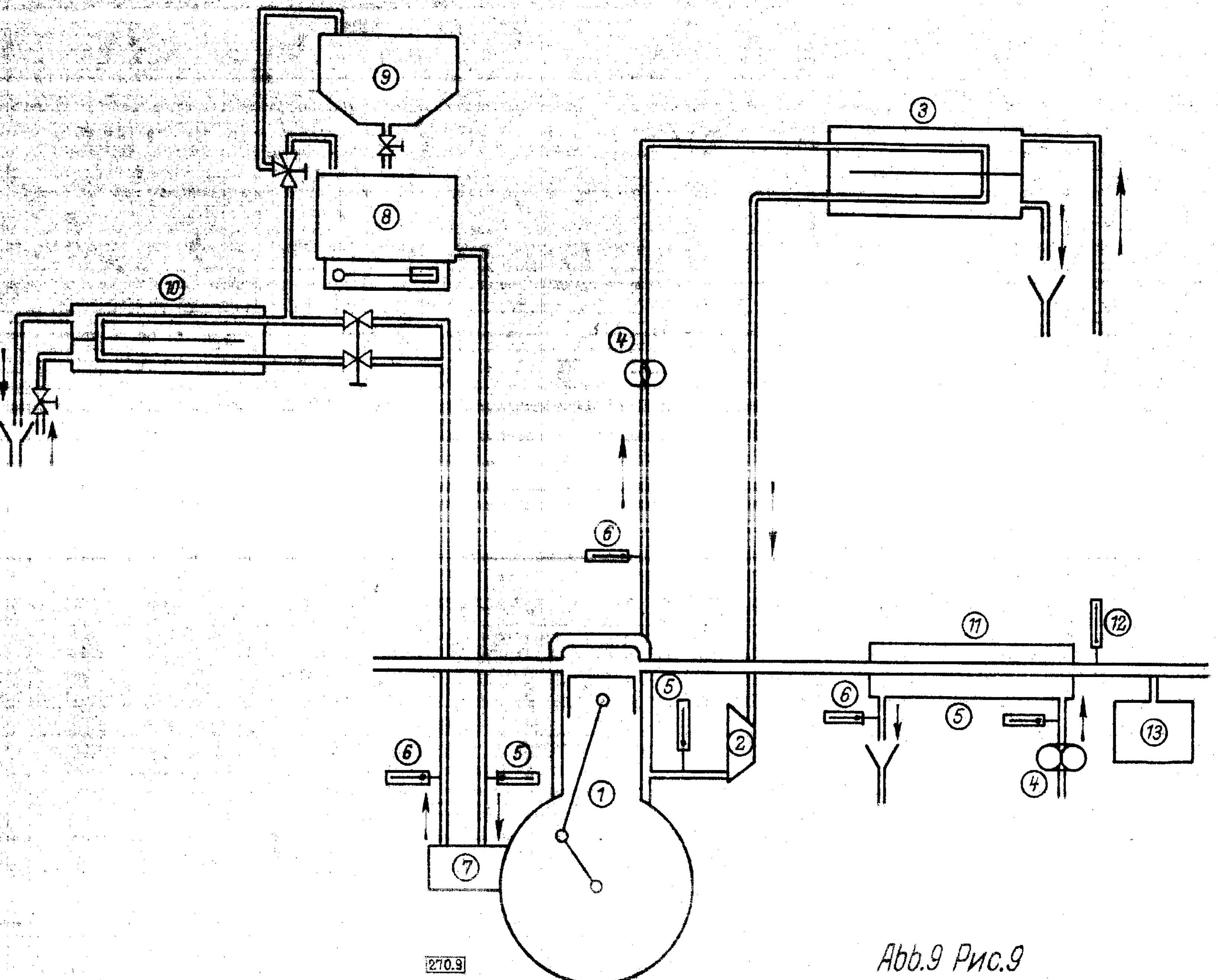


Abb.9 Рис.9

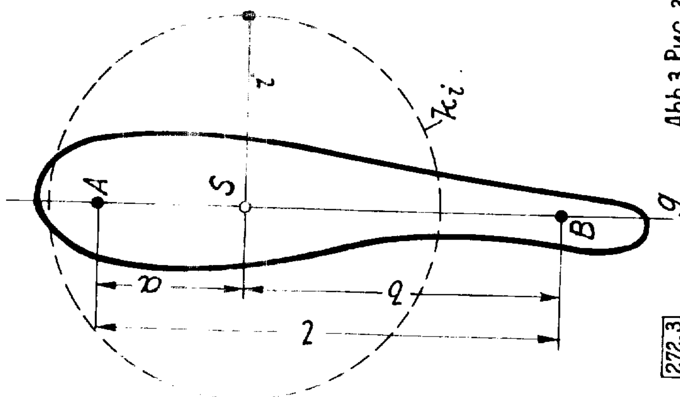


Abb.3 Рис.3

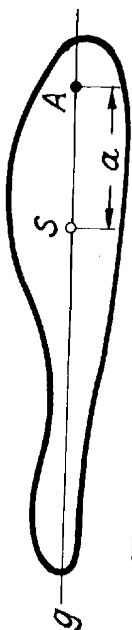


Abb.1 Рис.1

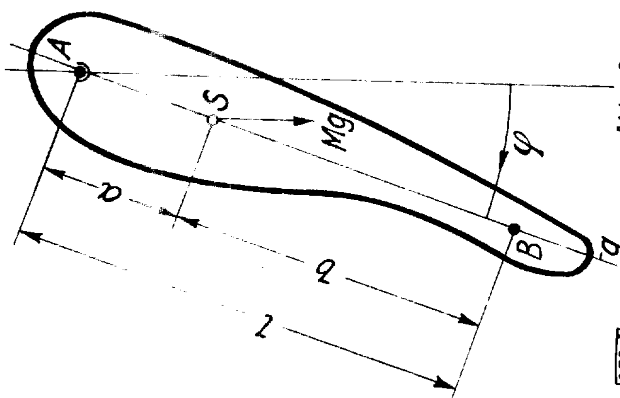


Abb.2 Рис.2

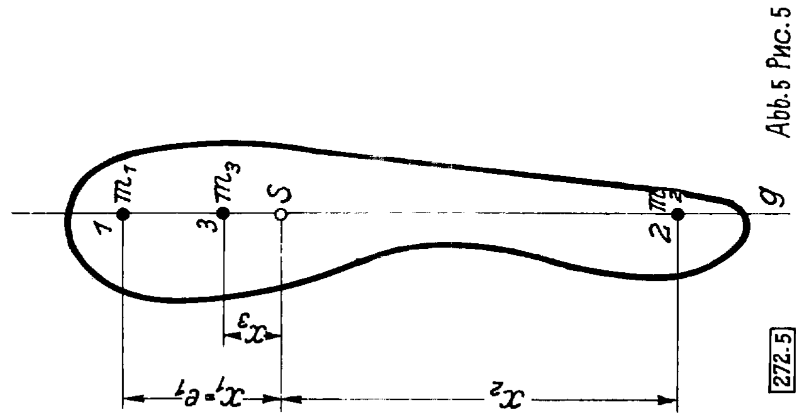


Abb.5 Рис.5

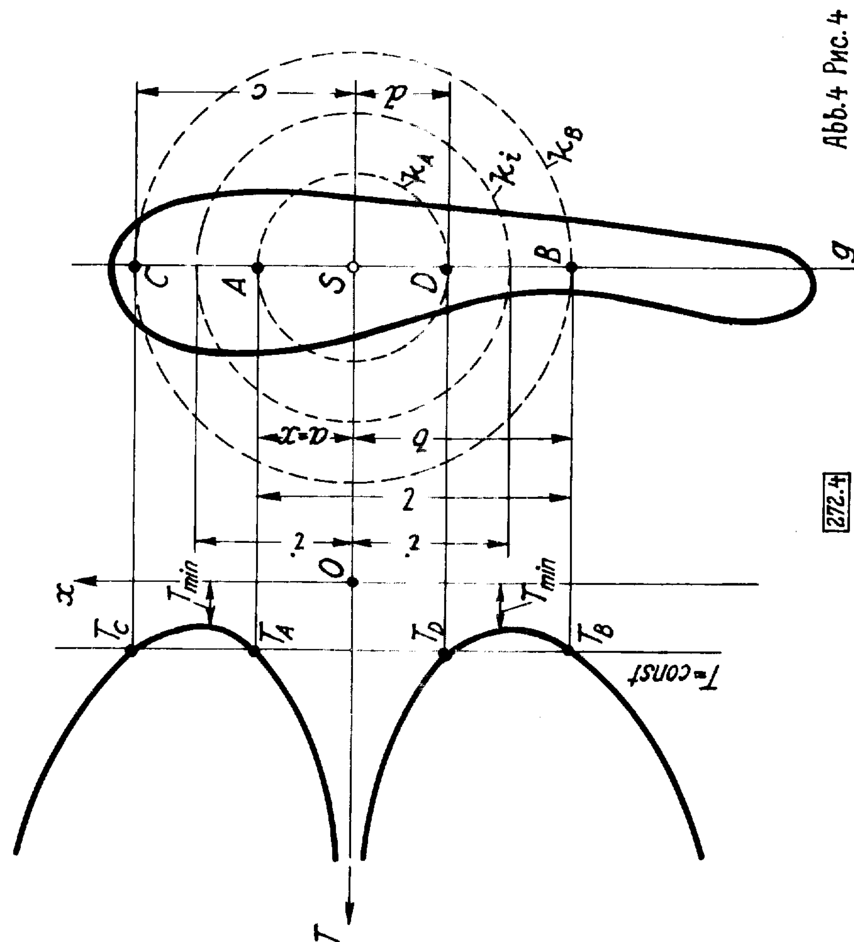


Abb.4 Рис.4

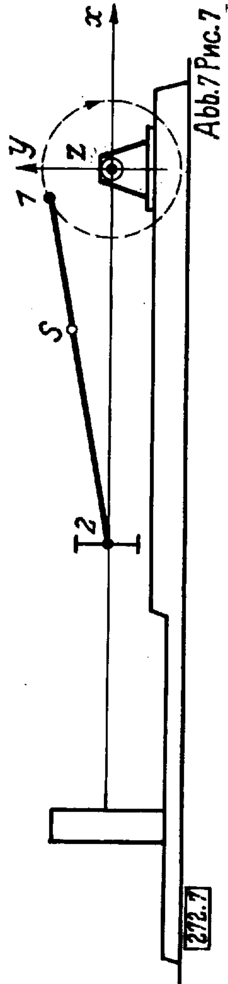


Abb.7 Рис.7

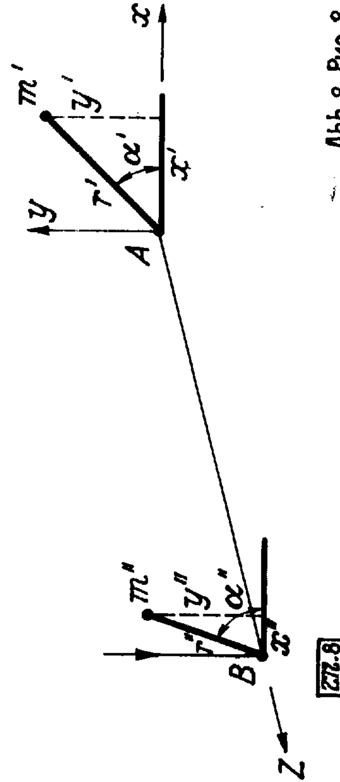


Abb.8 Рис.8

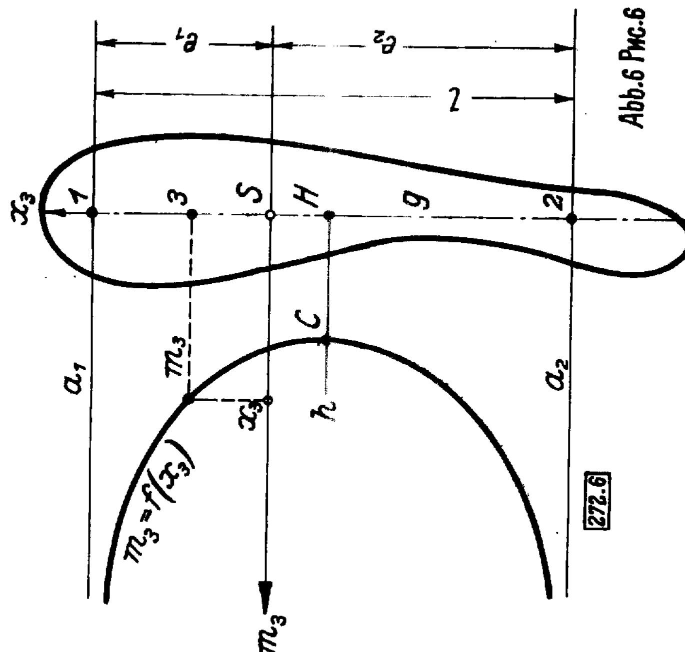


Abb.6 Рис.6

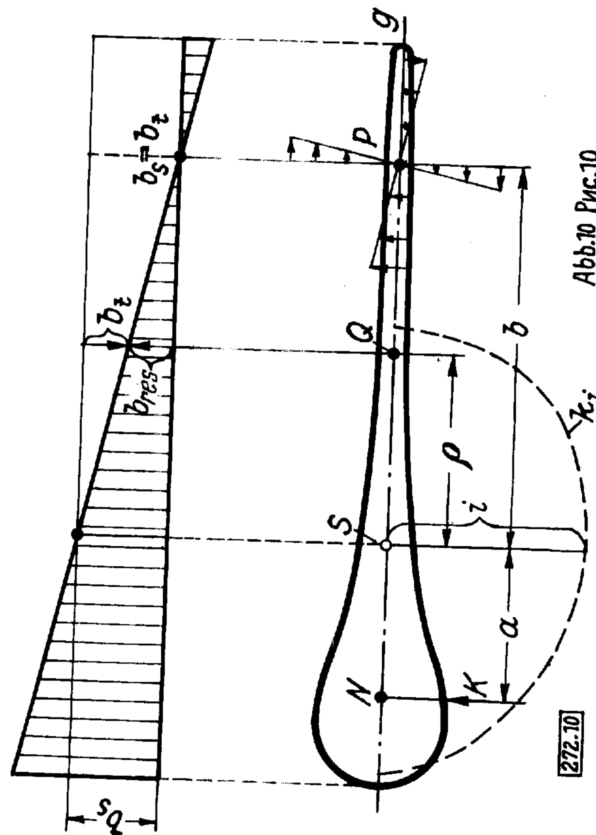


Abb.10 Рис.10

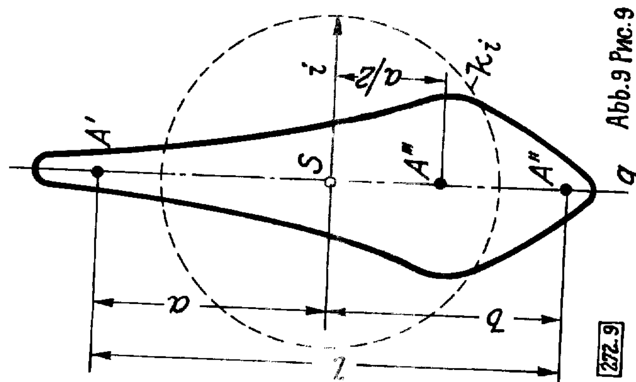
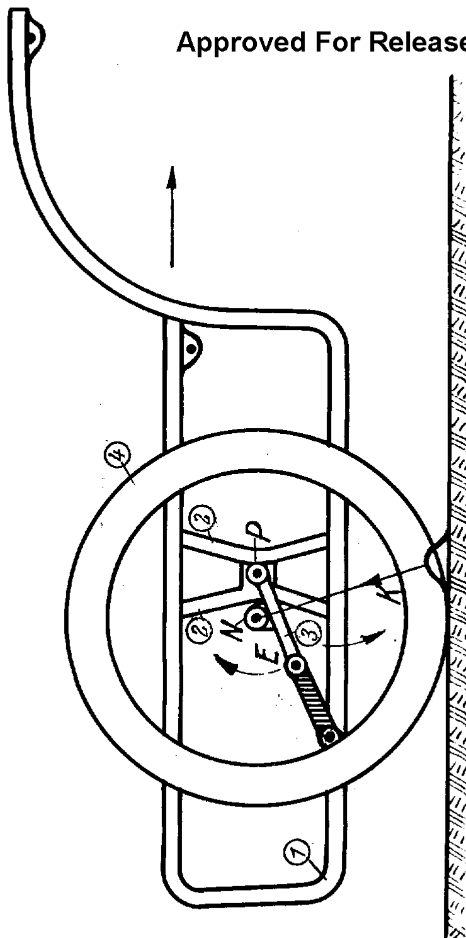


Abb.9 Рис.9



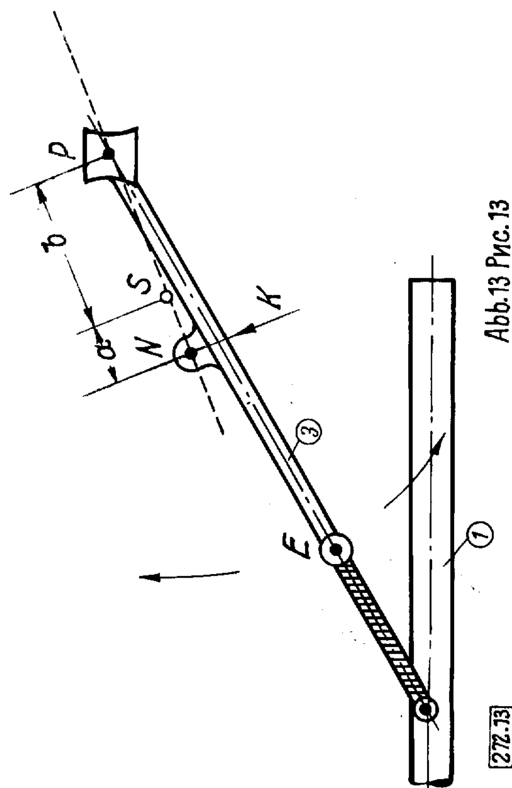


Abb.13 Рис.13

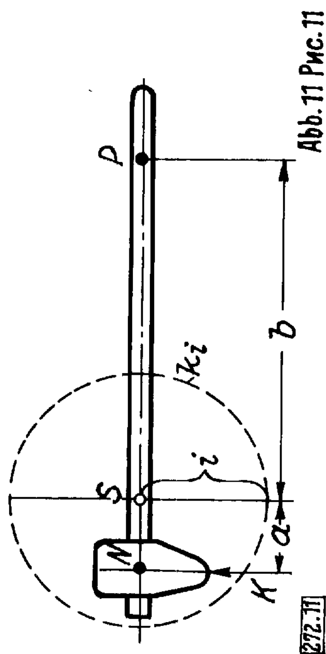


Abb.11 Рис.11

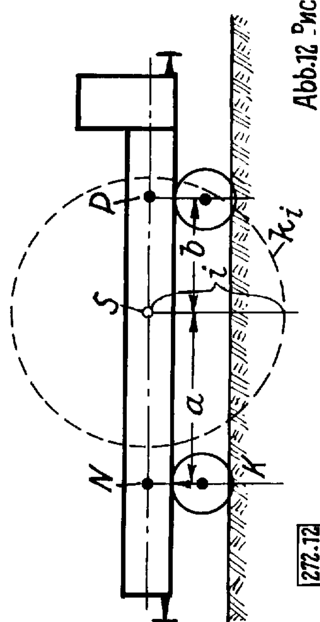


Abb.12 Рис.12

272.15

Abb.15 Рис.15

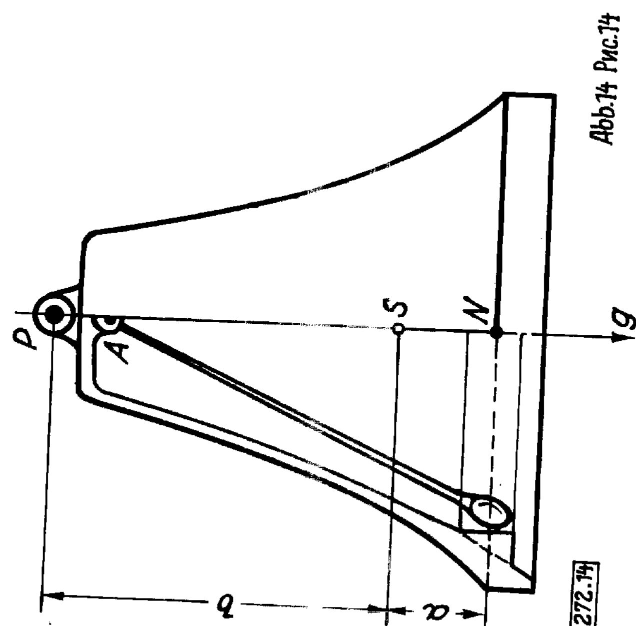


Abb.14 Рис.14

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

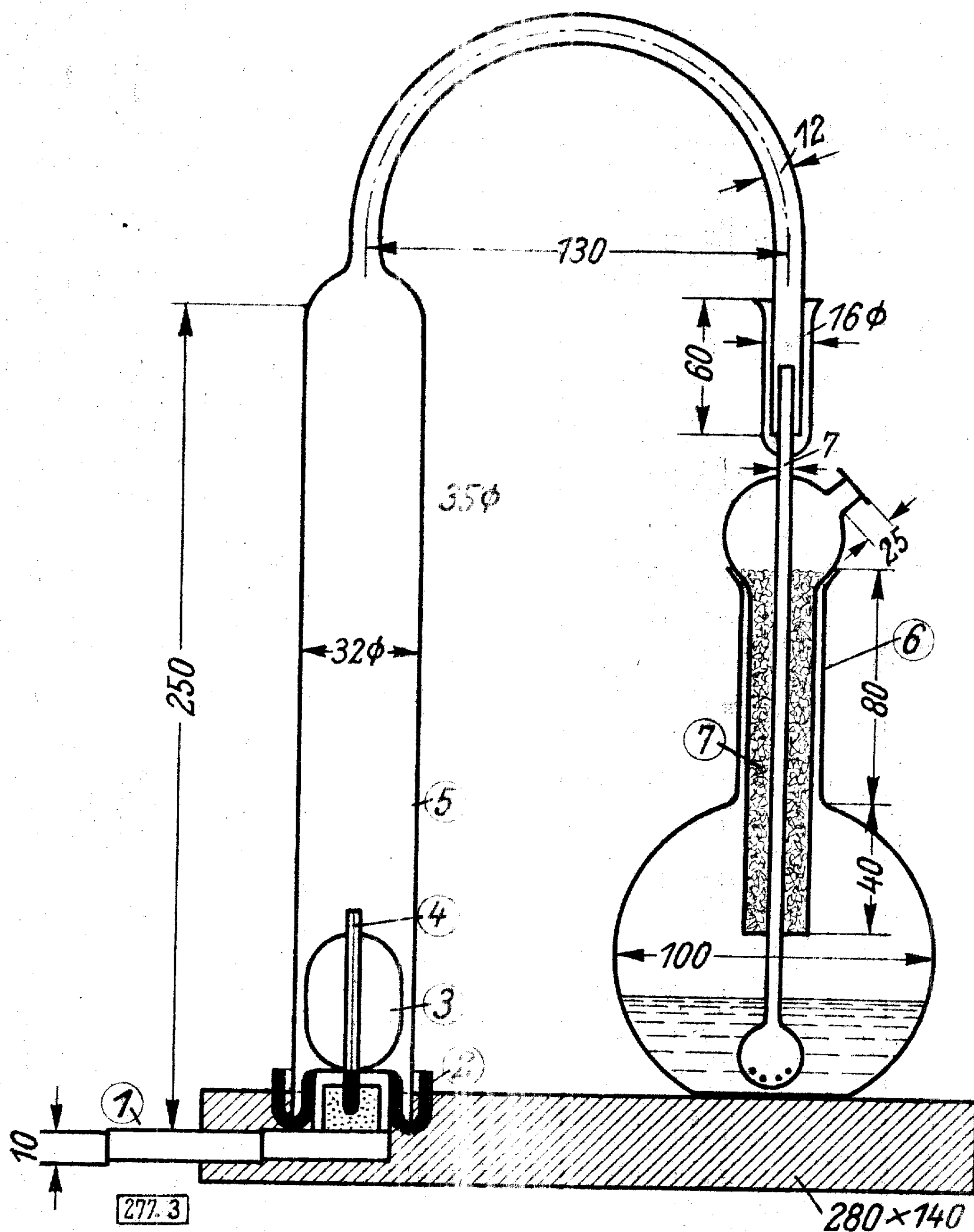


Abb. 3 Рис. 3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

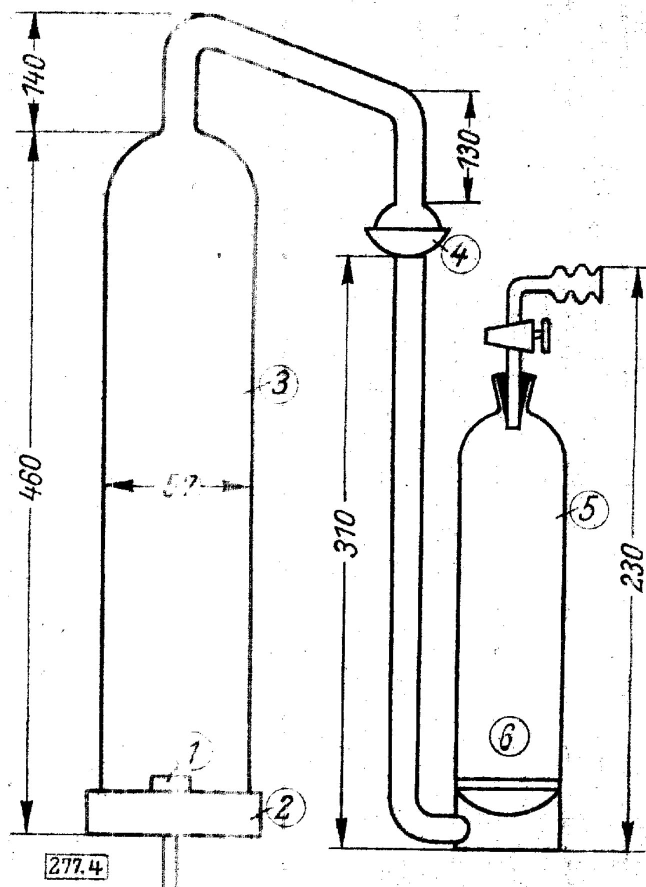


Abb. 4 Рис. 4

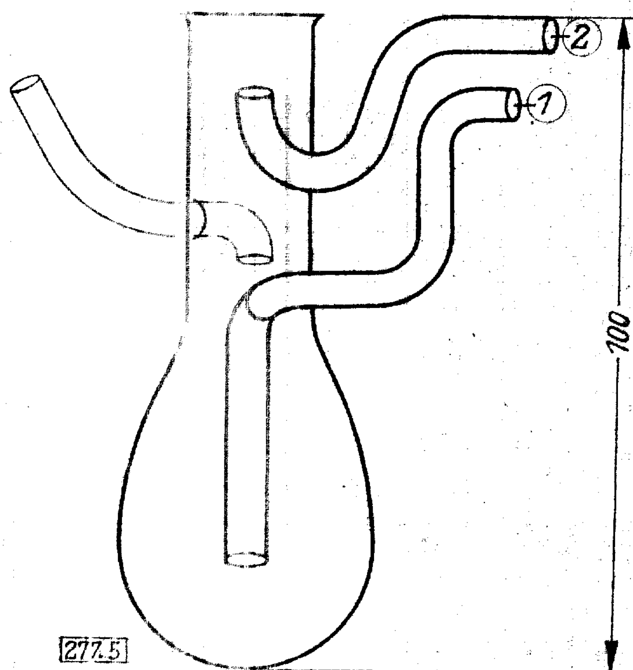
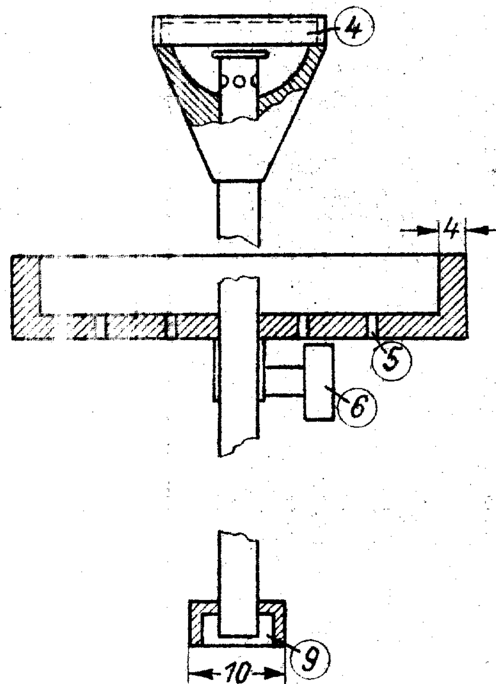


Abb. 5 Рис. 5

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



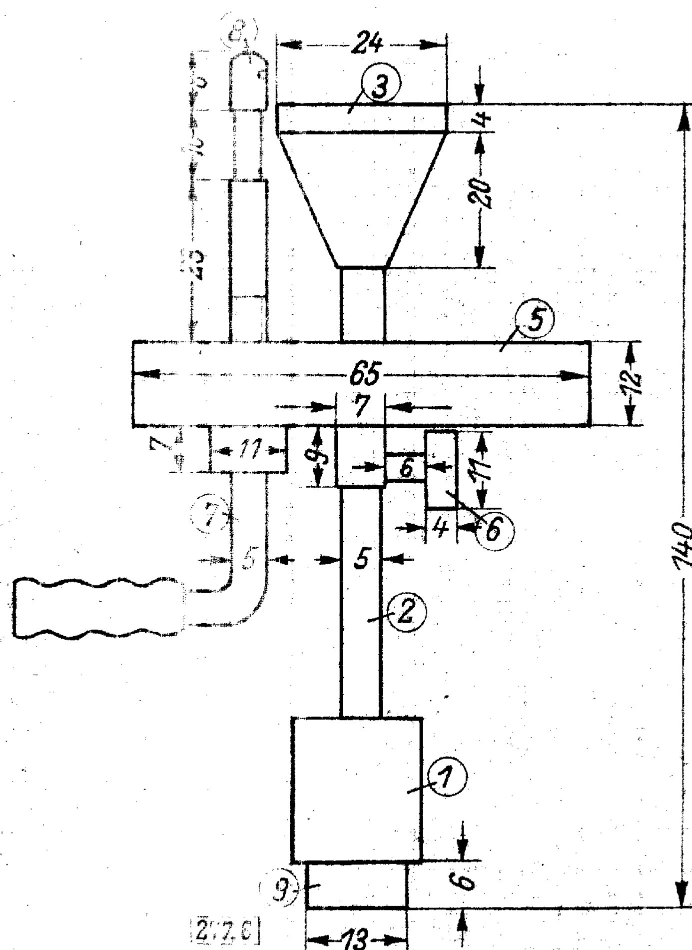


Abb.6 Рис.6

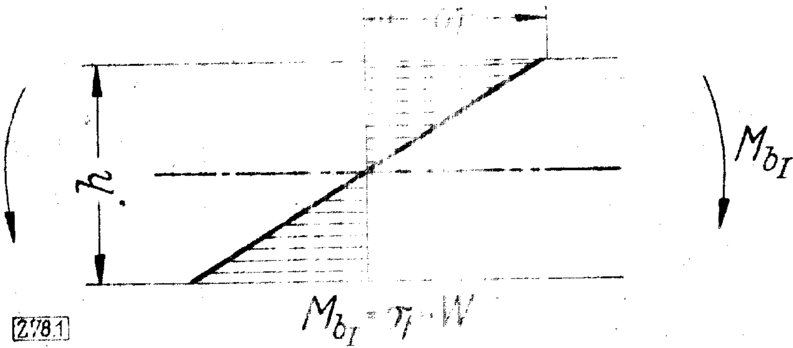


Abb. 1
РИС.1

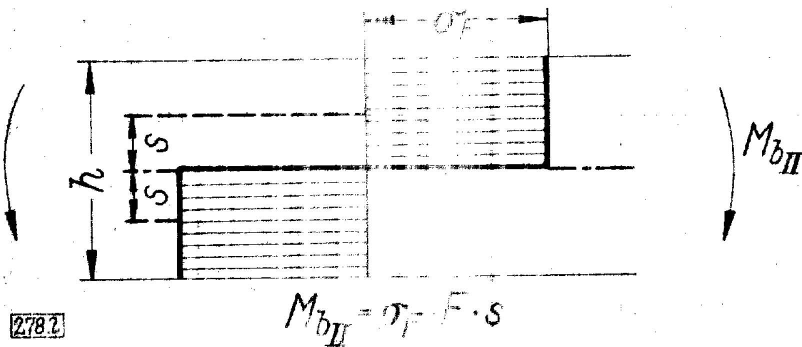


Abb. 2
РИС.2

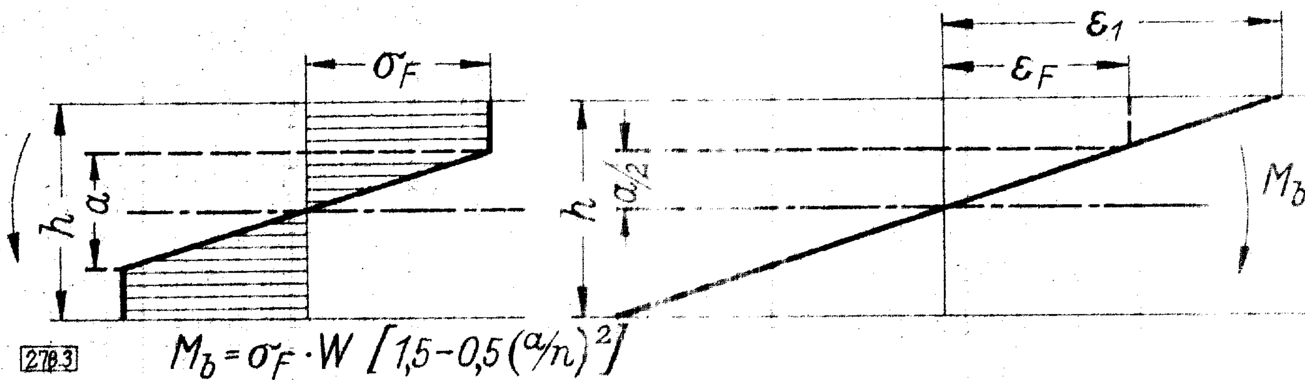


Abb.3
РИС.3

30 kg/mm²

$\sigma_b^* = f(\varepsilon_1)$

$\sigma_1 = \sigma_F^*$

II

I

20

10

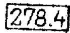
0

напряжение
Spannung $\sigma = \frac{P}{F}$ bzw. $\sigma_b^* = \frac{M_b}{W}$

$\varepsilon_{bleibend}$

~0,05

0 0,1 0,2 0,3 % 0,4



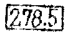
Dehnung ε bzw. ε_1
удлинение

Abb. 4
РИС. 4

−20 −10 0 10 +20

a

h



$-\sigma_F$ $+\sigma_F$

Abb. 5
РИС. 5

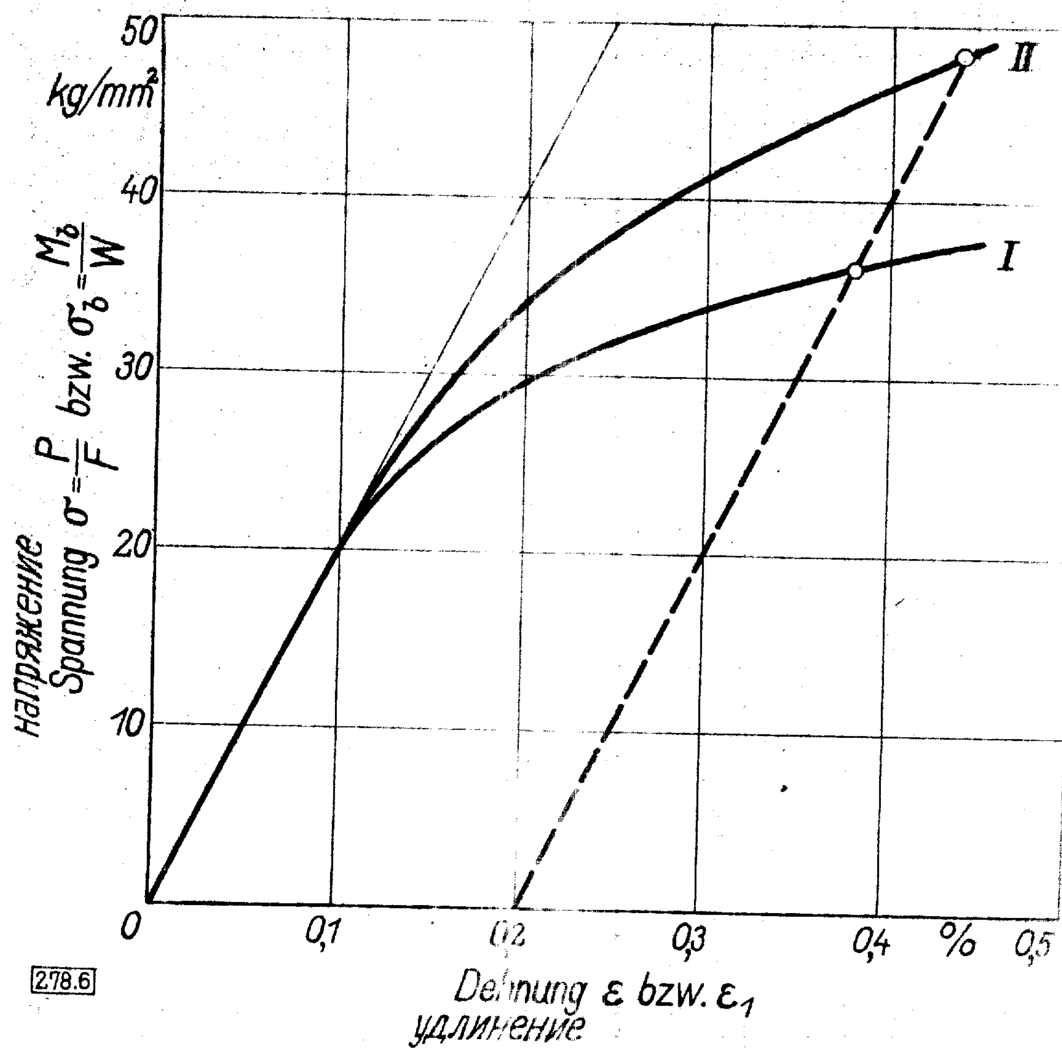


Abb. 6
РИС. 6

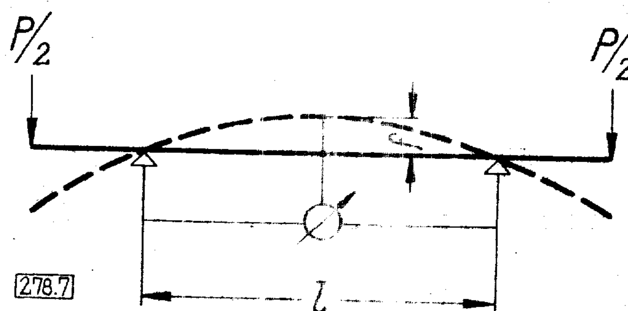
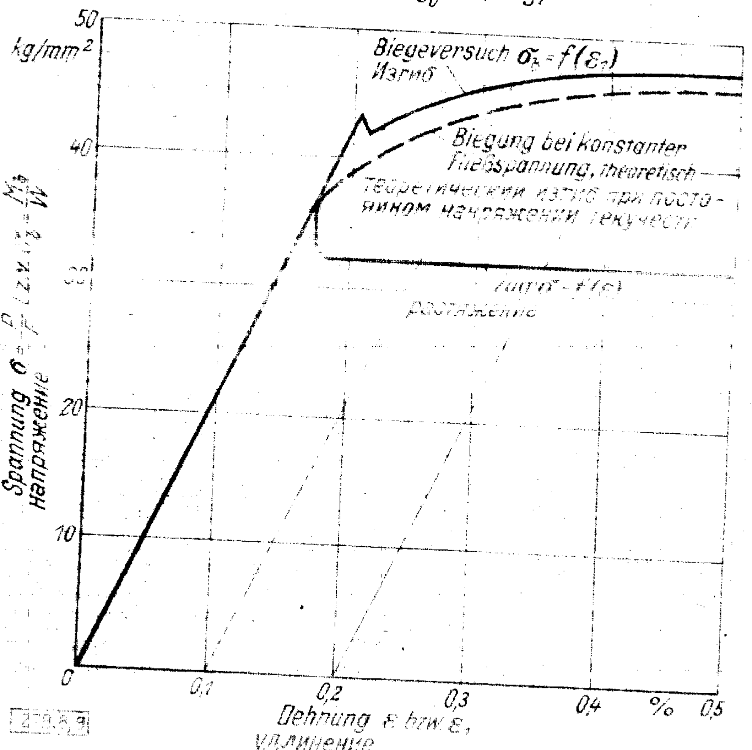


Abb. 7
РИС. 7

Werkstoff mit ausgesprochener oberer und unterer Fließgrenze Stahl 52, normal geglüht

Материал с ясно выраженными верхним и нижним пределом текучести, сталь 52, нормально отожжена

$\sigma_{S_o} = 36{,}3\ kg/mm^2, \quad \sigma_{S_u} = 31{,}9\ kg/mm^2$



Werkstoff mit stetig verlaufender Spannungs-Dehnungs-Kurve: Fliegwerkstoff 3115.5 Al-Cu-Mg, ausgehärtet

Материал с непрерывно возрастающей кривой-напряжение удлинение: авиаматериал 3115.5 Al-Cu-Mg, закален

$\sigma_{0,2} = 30{,}7\ kg/mm^2$

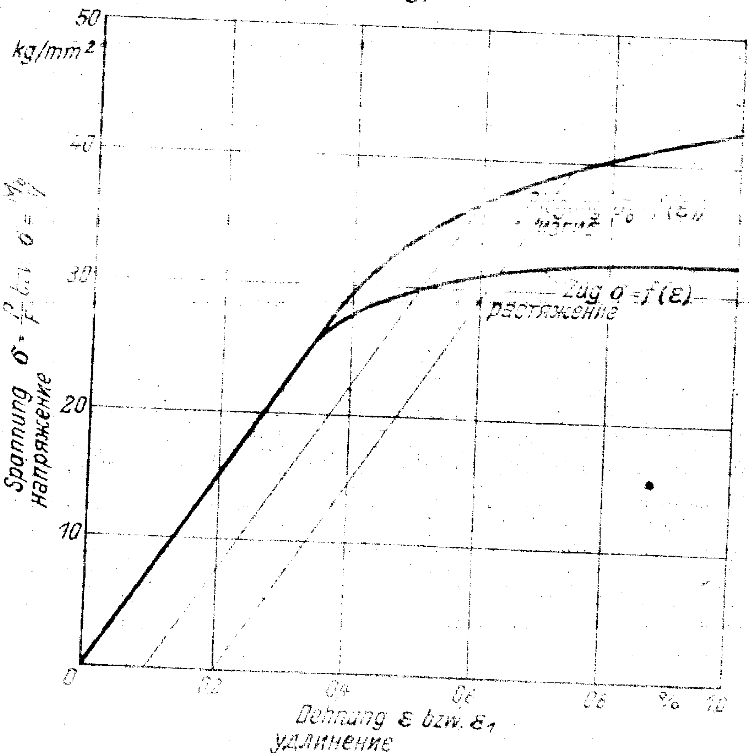


Abb. 8,9 Рис. 8,9

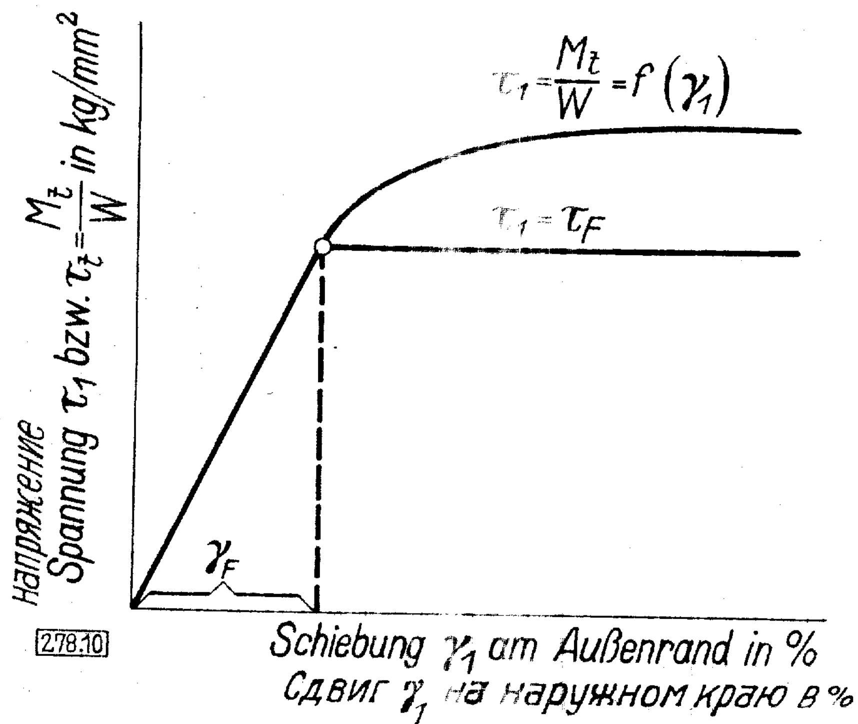


Abb. 10
РИС. 10

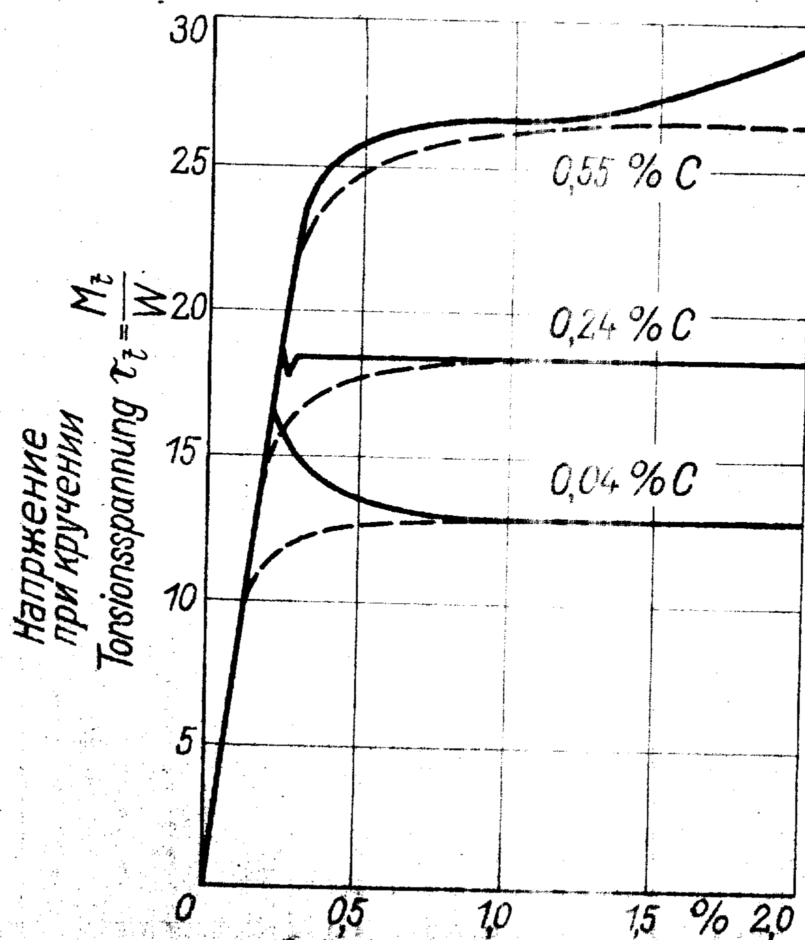
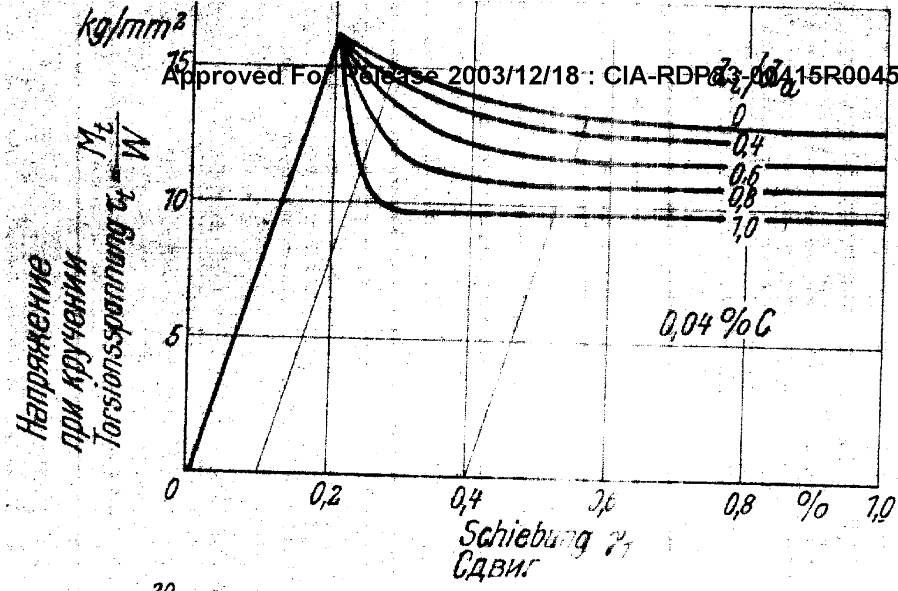
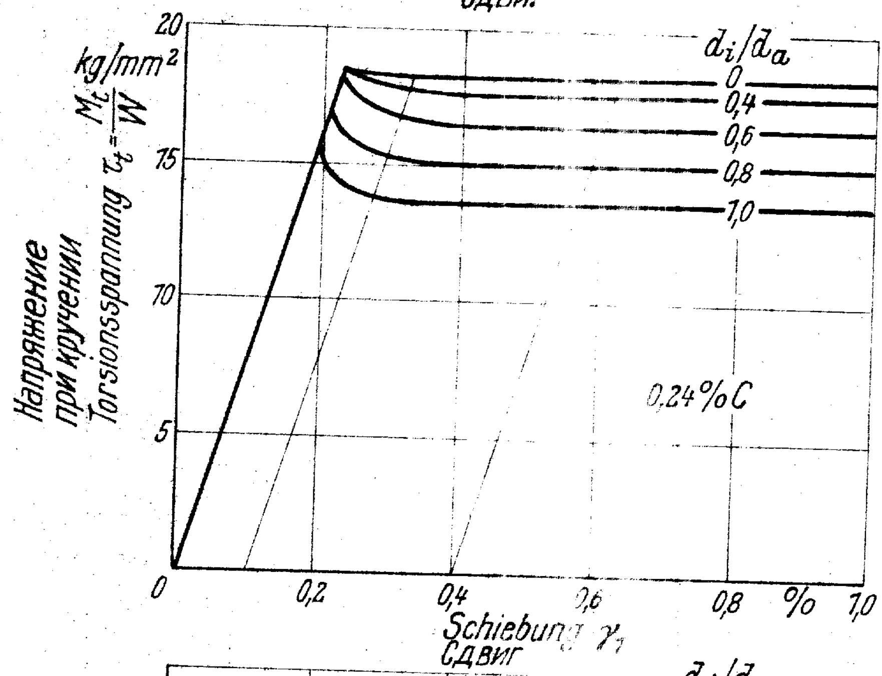


Abb. 11
РИС. 11





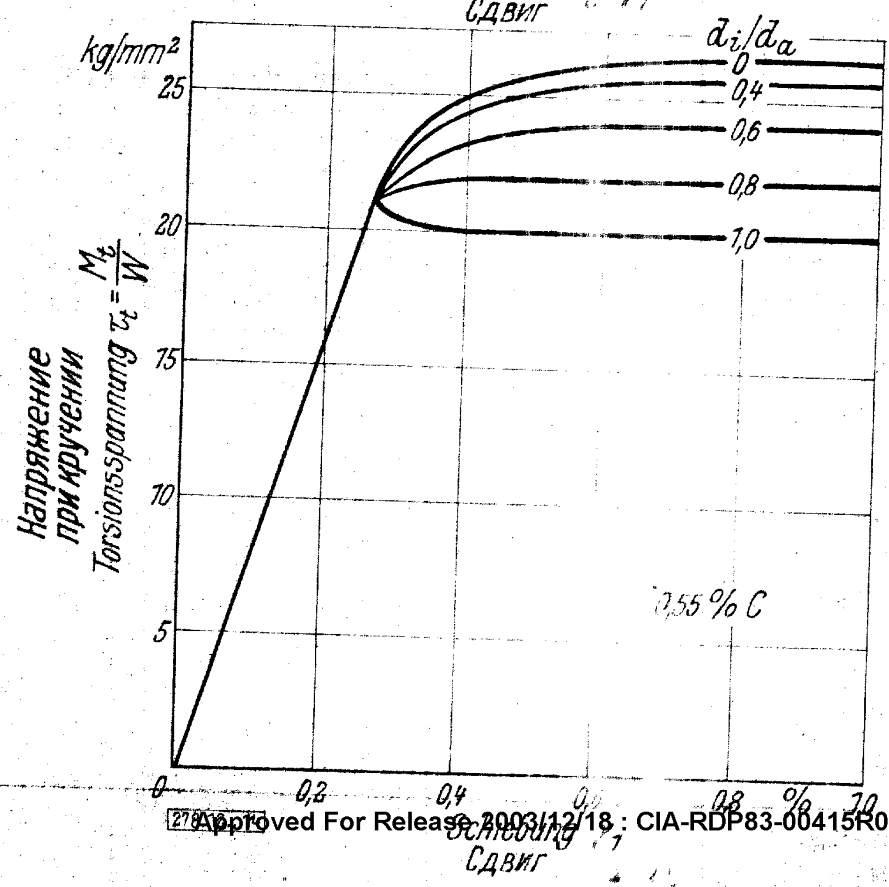


Abb. 12...14
Рис. 12...14

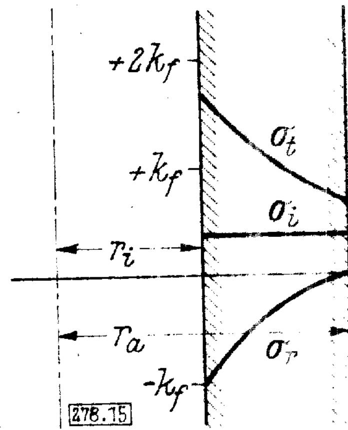


Abb. 15
Рис. 15

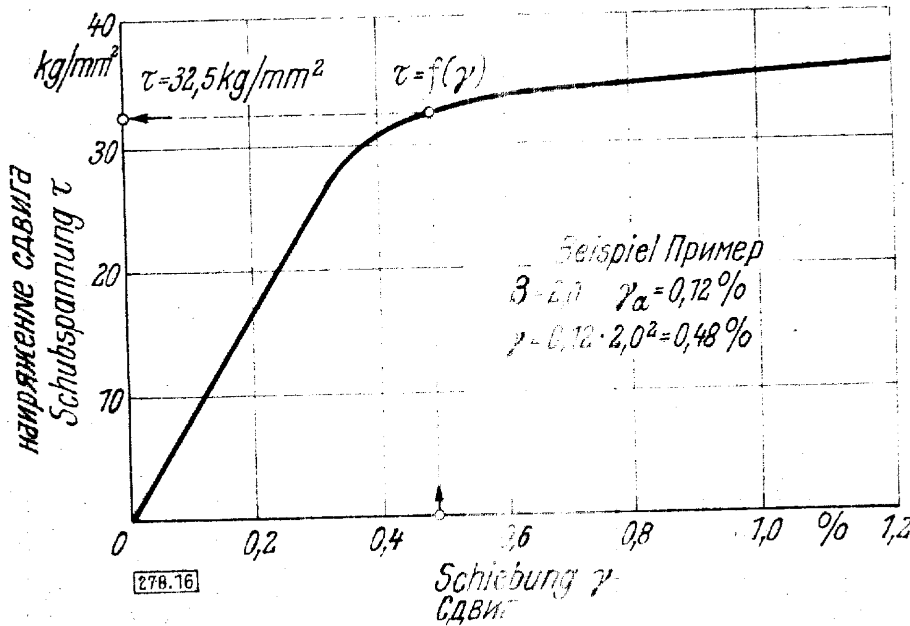


Abb. 16
Рис. 16

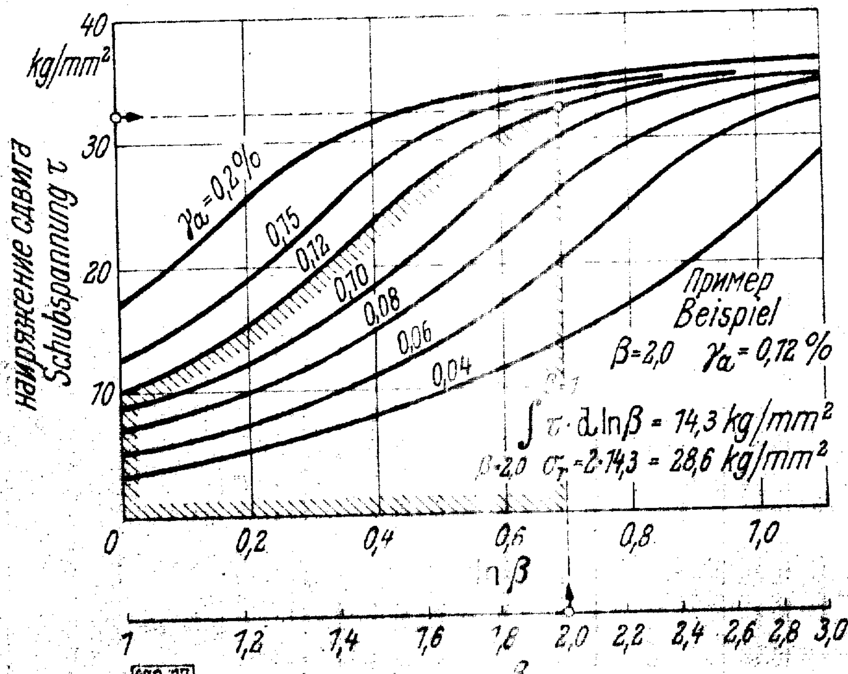


Abb. 17
Рис. 17

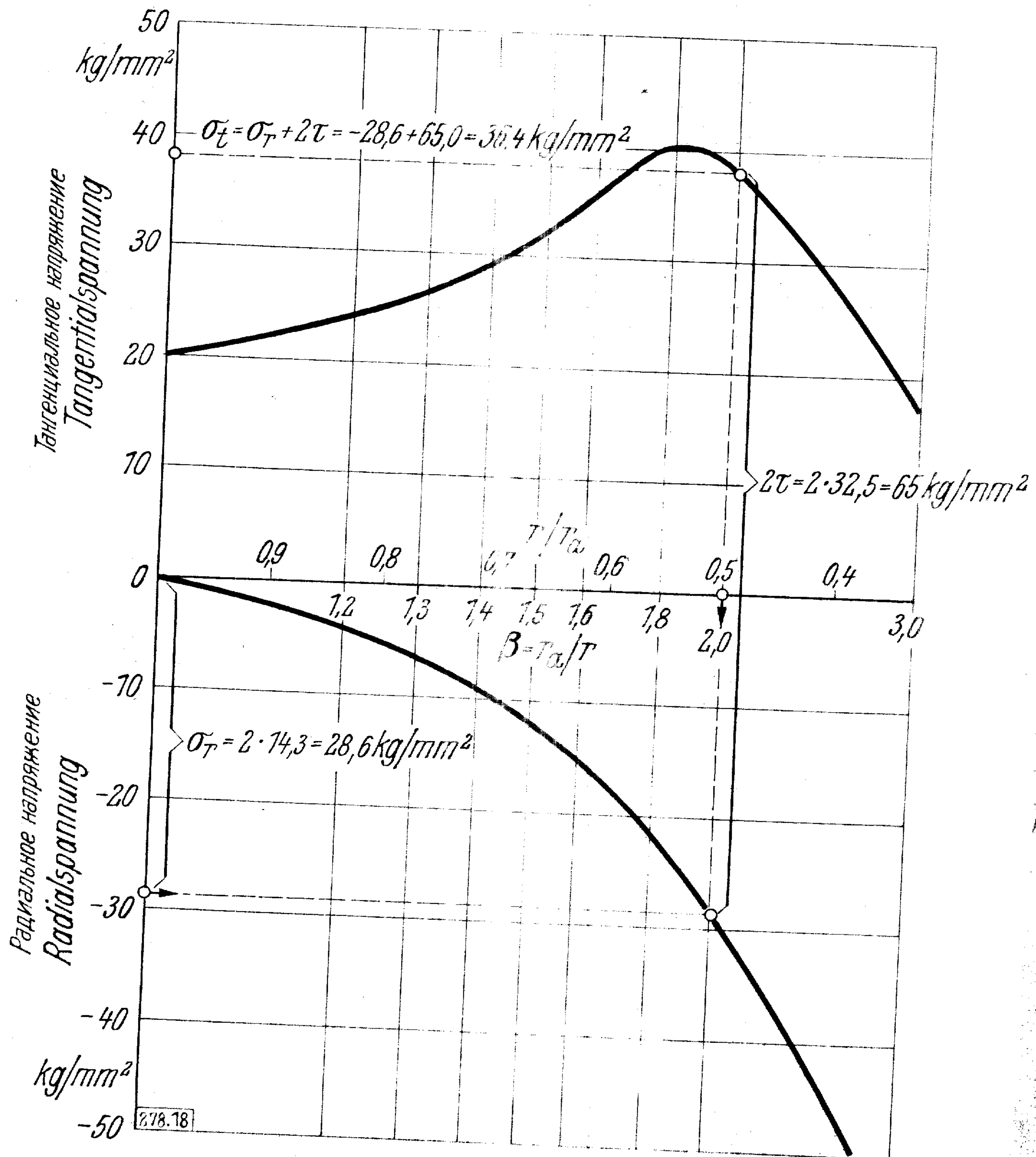

50
kg/mm²
40
$\sigma_t = \sigma_r + 2\tau = -28,6 + 65,0 = 36,4$ kg/mm²
30
20
10
Тангенциальное напряжение
Tangentialspannung
$2\tau = 2 \cdot 32,5 = 65$ kg/mm²
0
0,9
0,8
0,7
r/r_a
0,6
0,5
0,4
1,2
1,3
1,4
1,5
1,6
1,8
2,0
3,0
$\beta = r_a/r$
-10
-20
-30
-40
-50
kg/mm²
$\sigma_r = 2 \cdot 14,3 = 28,6$ kg/mm²
Радиальное напряжение
Radialspannung
278.18

Abb. 18
Рис. 18

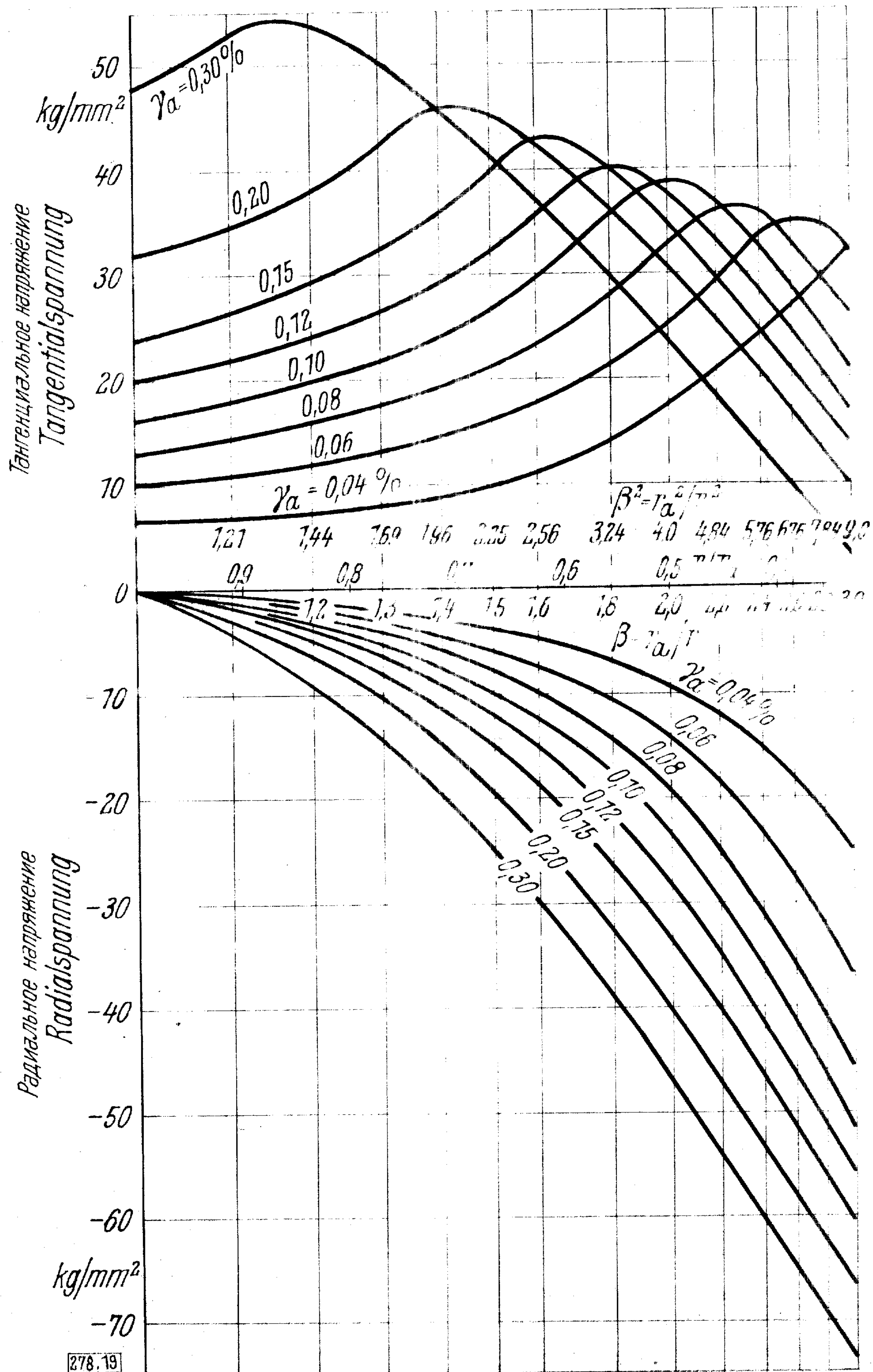
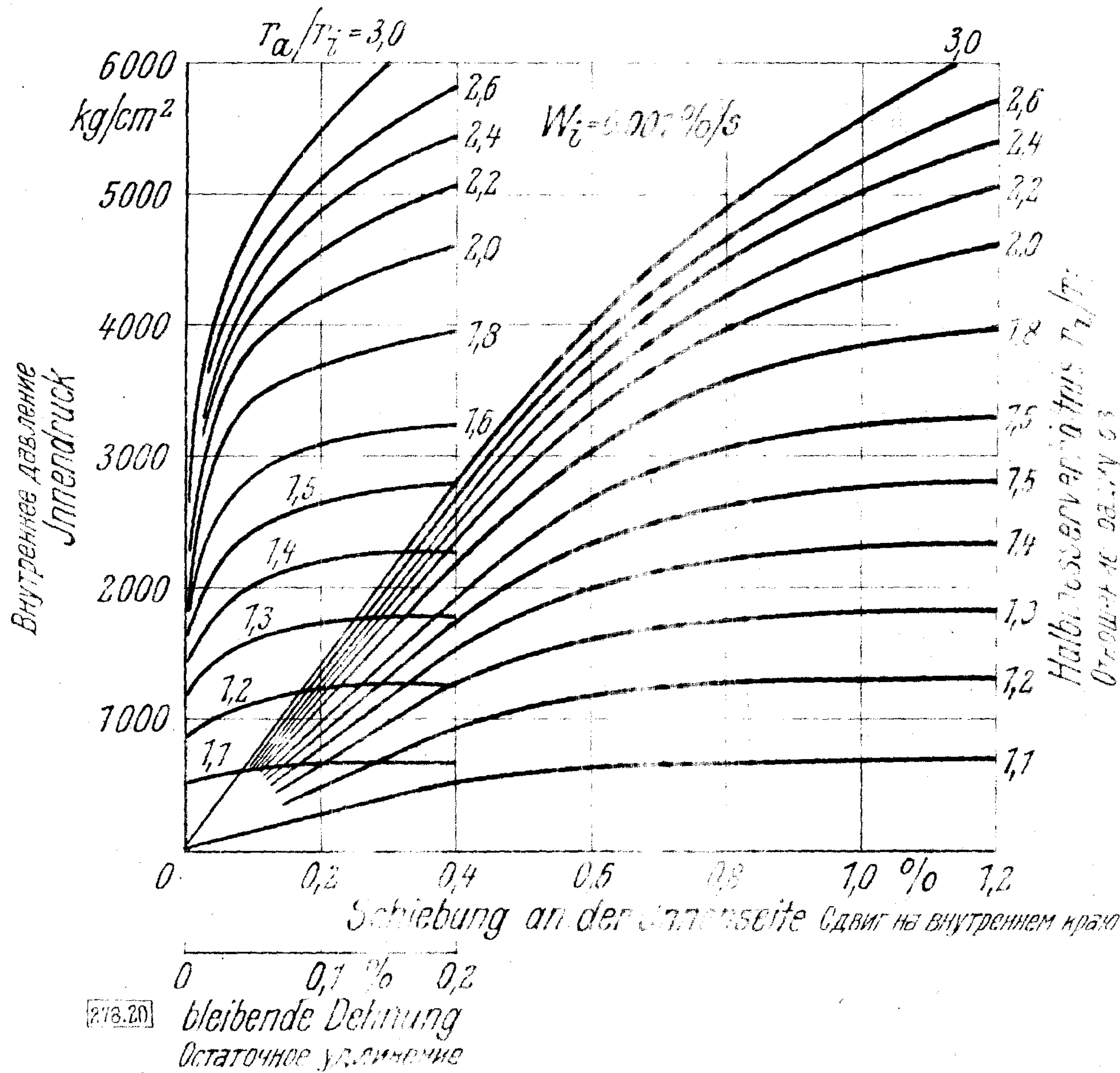
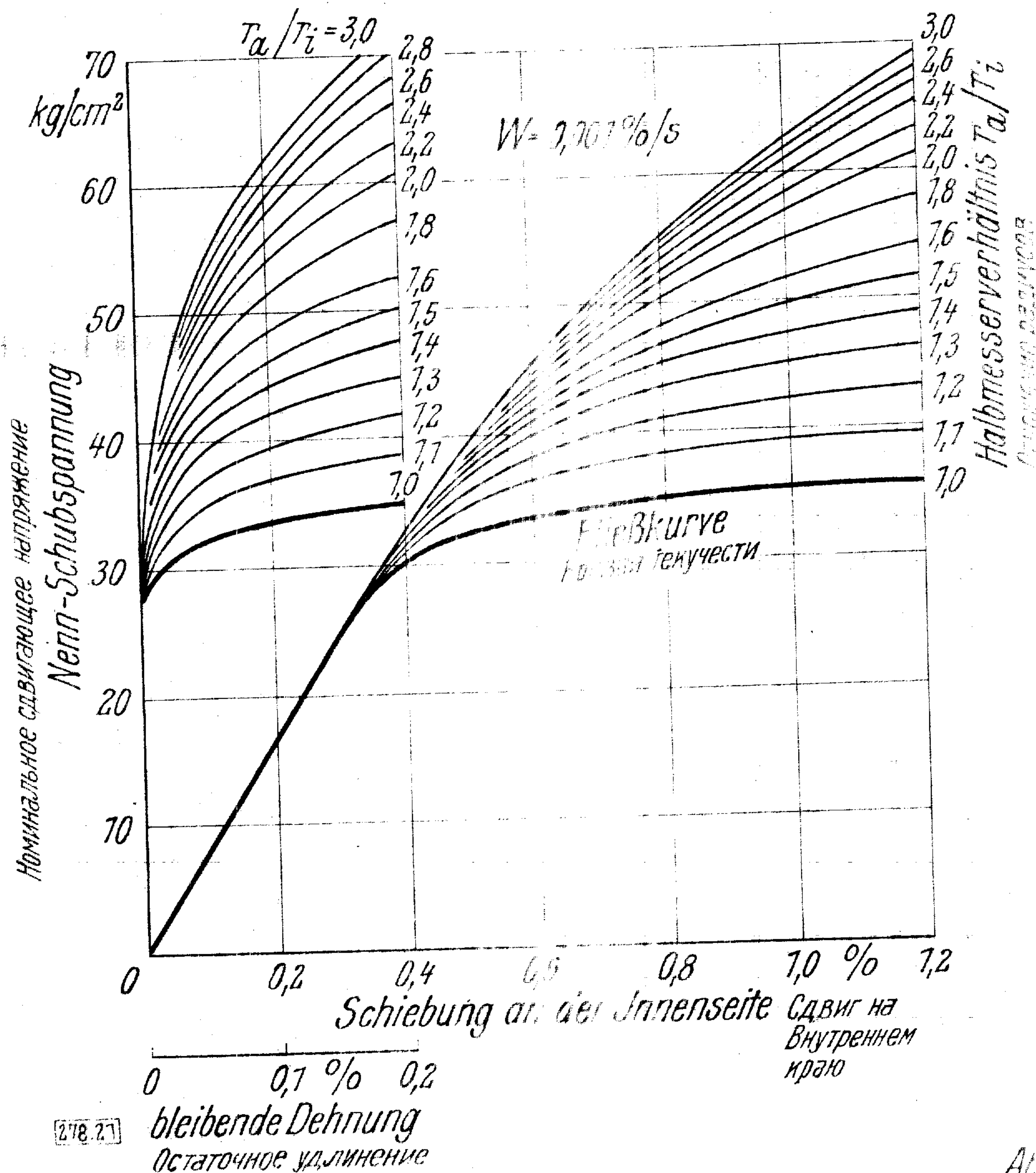

50
kg/mm²
γ_a = 0,30%
40
0,20
30
0,15
0,12
20
0,10
0,08
0,06
10
γ_a = 0,04 %
Тангенциальное напряжение
Tangentialspannung
1,21
1,44
1,96
2,56
3,24
4,0
0,9
0,8
0,6
0,5
0
1,2
1,5
1,6
1,8
2,0
$\beta = r_a / r$
γ_a = 0,04 %
0,06
0,08
0,10
0,12
0,15
0,20
0,30
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
kg/mm²
Радиальное напряжение
Radialspannung
278.19

Abb. 19
Рис. 19



Ta/Ti = 3,0
6000 kg/cm²
5000
4000
3000
2000
1000
Внутреннее давление
Innendruck
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
3,0
0
0,2
0,4
0,6
1,0 %
1,2
Сдвиг на внутреннем краю
0
0,1 %
0,2
276.20
bleibende

Abb. 20
Рис. 20



$T_a/T_i = 3,0$
70
kg/cm²
60
50
40
30
20
10
0
Номинальное сдвигающее напряжение
Nenn-Schubspannung
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0
W= 0,001 %/s
3,0
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0
Halbmesserverhältnis T_a/T_i
Fließkurve
Кривая текучести
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0 %
1,2
Schiebung an der Innenseite
Сдвиг на Внутреннем краю
0
0,1 %
0,2
bleibende Dehnung
Остаточное удлинение

Abb. 21
Рис. 21

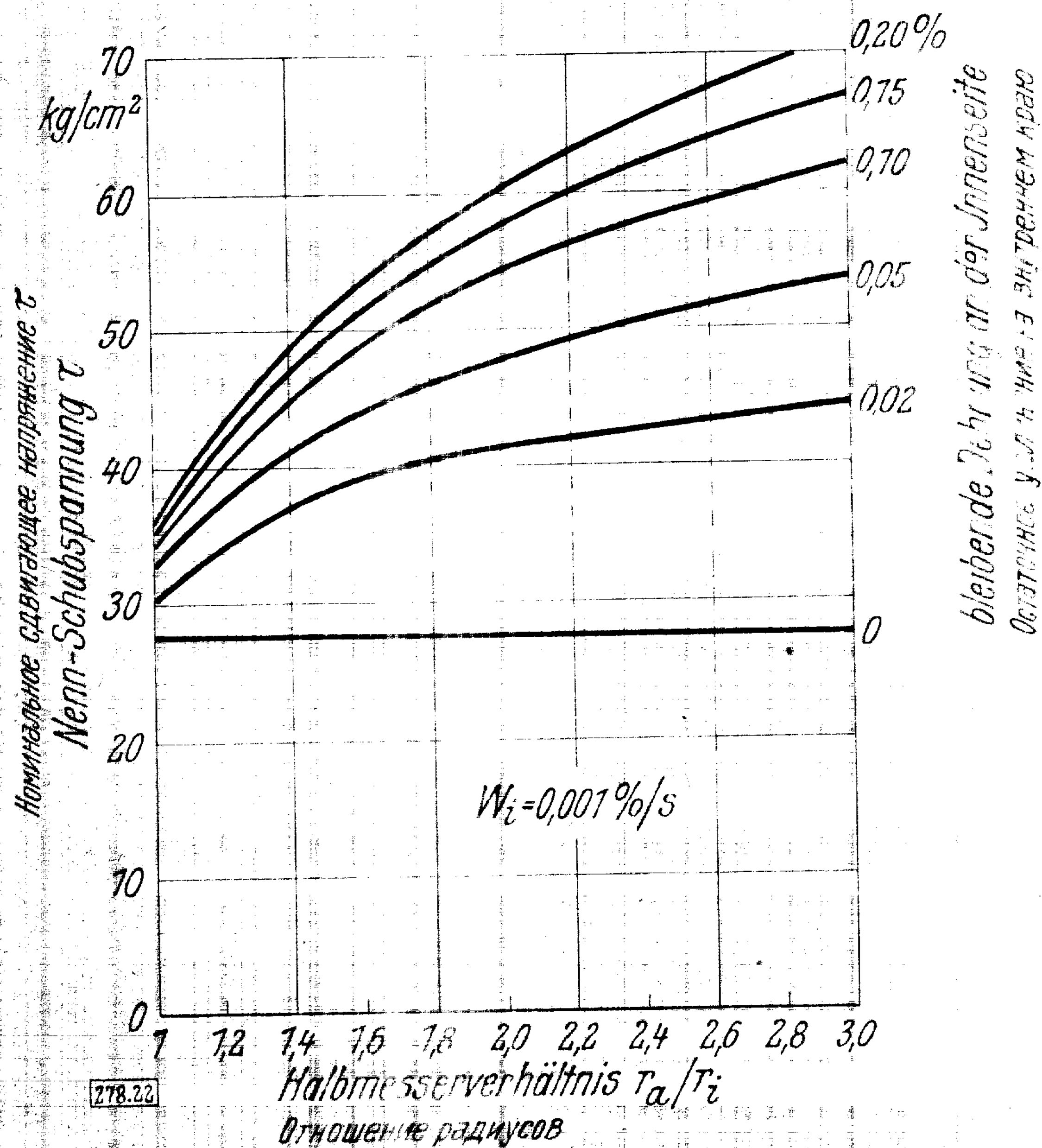
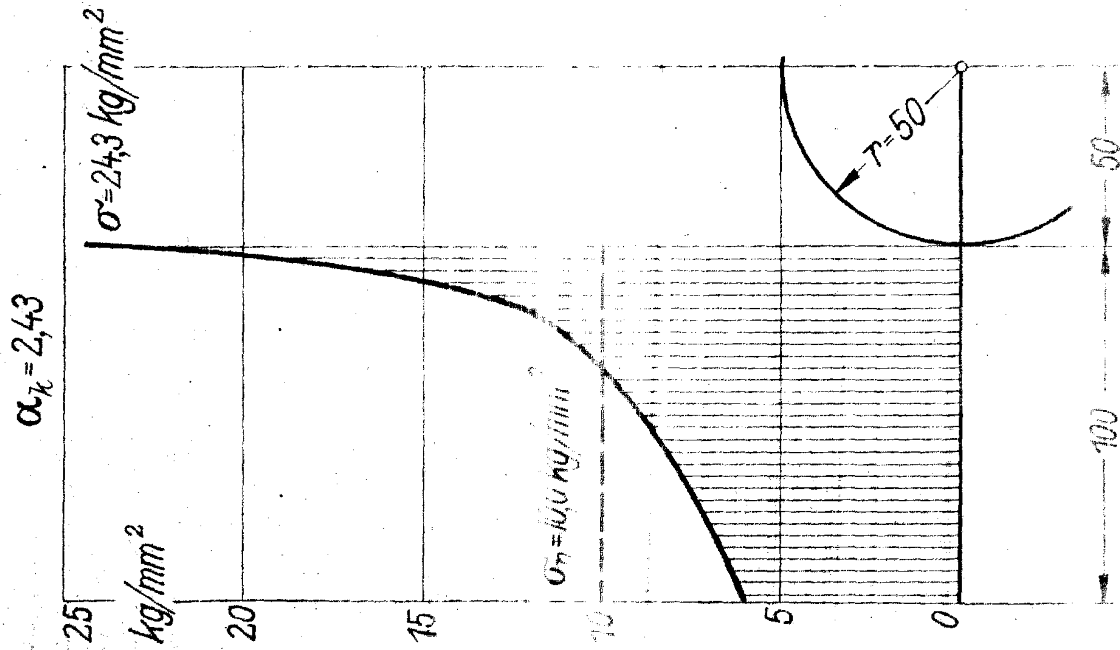
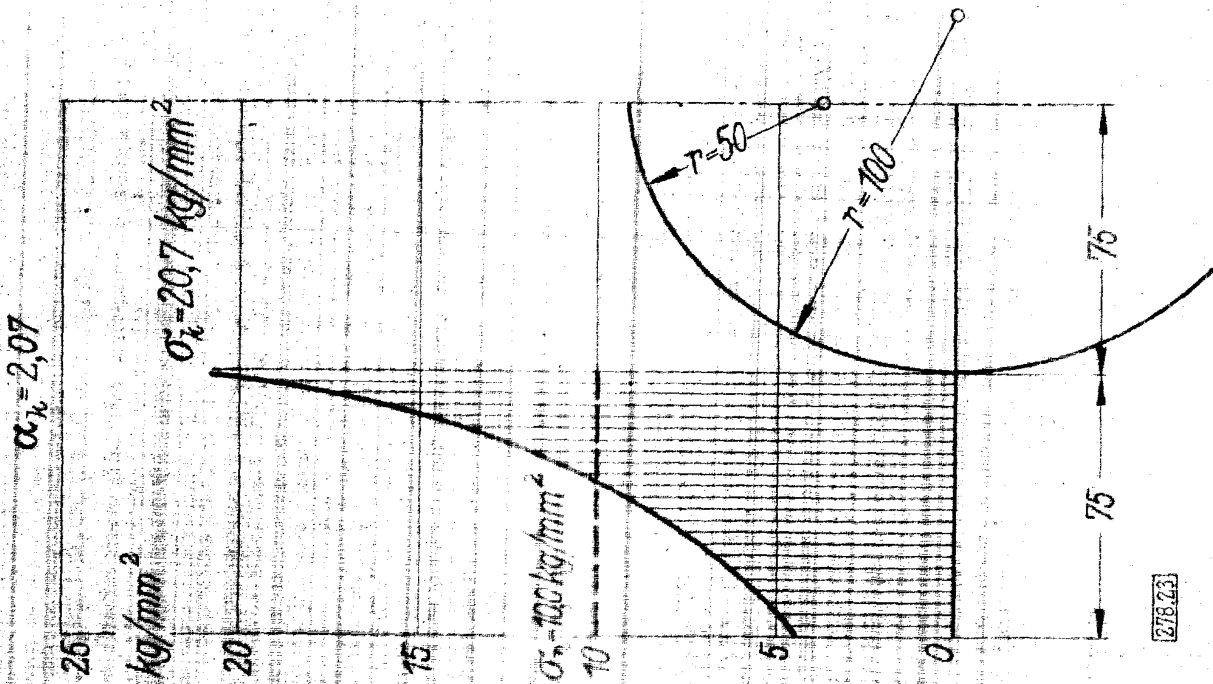

70
kg/cm²
60
50
40
30
20
10
0
Номинальное сдвигающее напряжение τ
Nenn-Schubspannung τ
1
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
2,2
2,4
2,6
2,8
3,0
Halbmesserverhältnis r_a/r_i
Отношение радиусов
0,20%
0,15
0,10
0,05
0,02
0
bleibende
der Innenseite
Остаточное
внутреннем краю
W_i=0,001%/s
278.22

Abb. 22
Рис. 22

Abb. 23
РИС.23





Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

60 kg/mm²
50
40
30
20
10
0

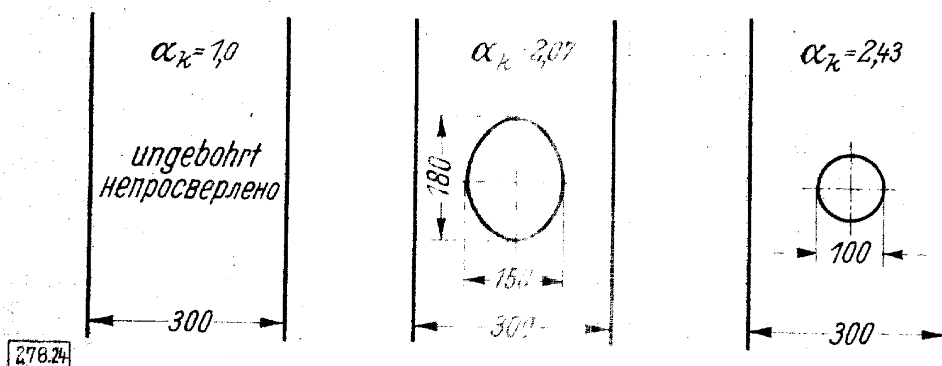
Spannung $\sigma_k = \sigma_n \cdot \alpha_k$
напряжение

$\alpha_k = 3{,}0$
$\alpha_k = 2{,}5$
Versuch $\alpha_k = 2{,}43$
Опыт $\alpha_k = 2{,}07$
$\alpha_k = 2{,}0$
$\alpha_k = 1{,}5$
Versuch $\alpha_k = 1{,}0$
Опыт

$\varepsilon_{bleib.} = 0{,}01\,\%$ остаточное
$\varepsilon_{bleib.} = 0{,}1\,\%$ остат.
$\varepsilon_{bleib.} = 0{,}2\,\%$ остат.

0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5

Dehnung ε
удлинение



278.24

Abb. 24 Рис. 24

II

I



Abb.1 Рис.1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

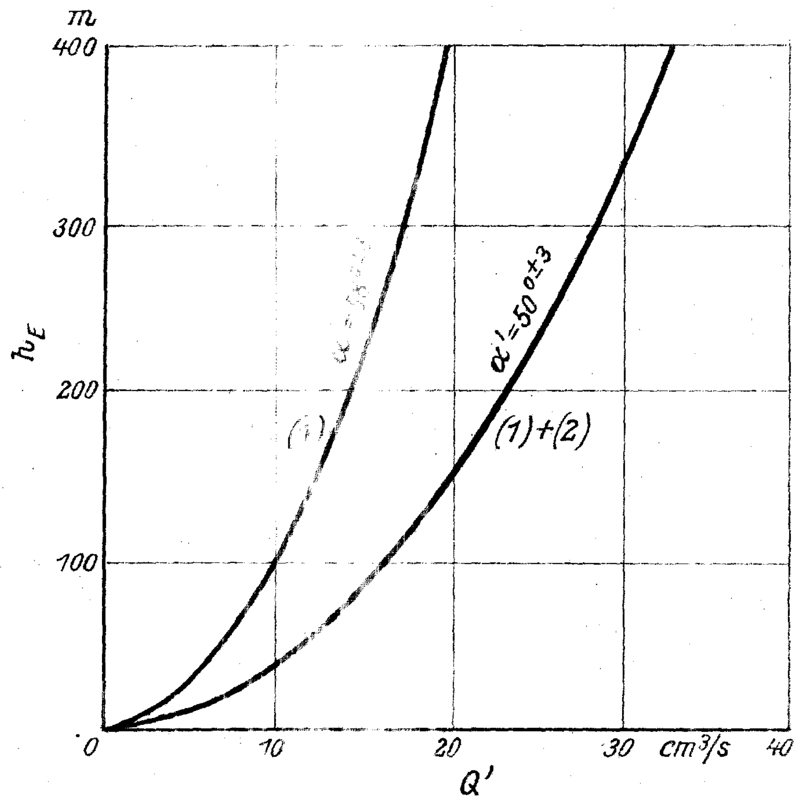


Abb.2 Рис.2.

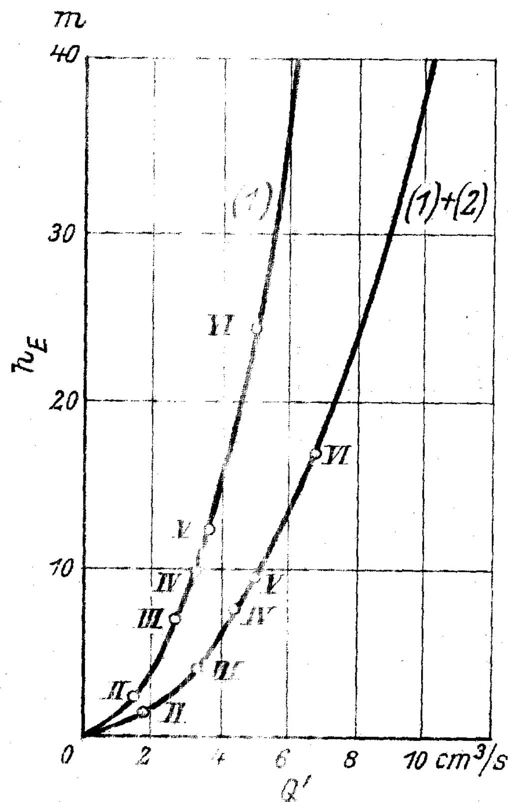
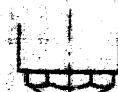


Abb.3 Рис.3



I



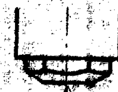
II



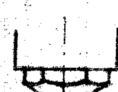
III



IV



V



VI

279.4

Abb. 4 Рис. 4

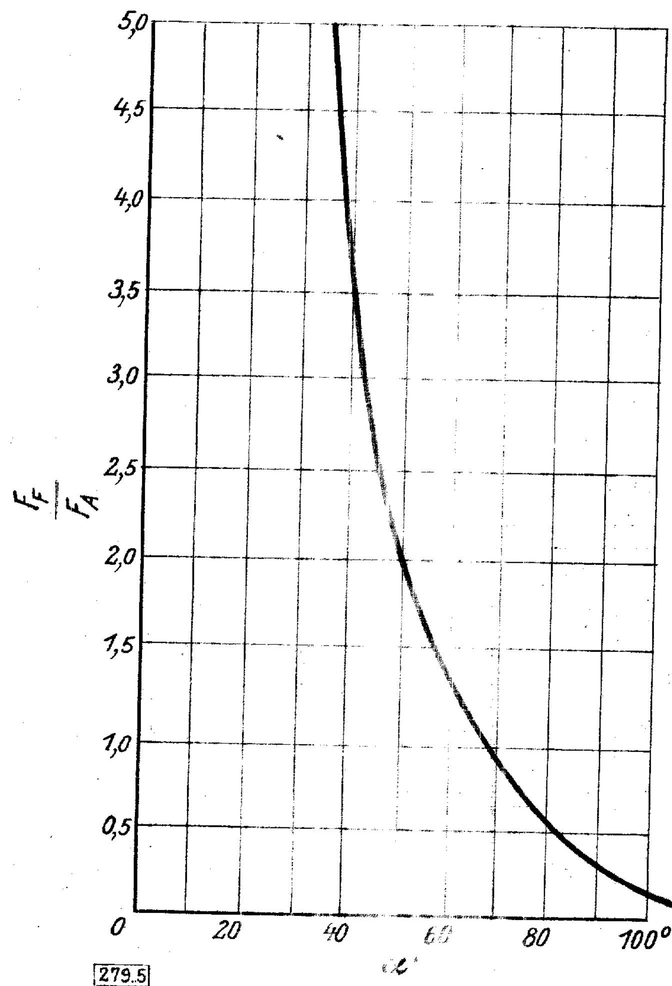


Abb.5 Рис.5

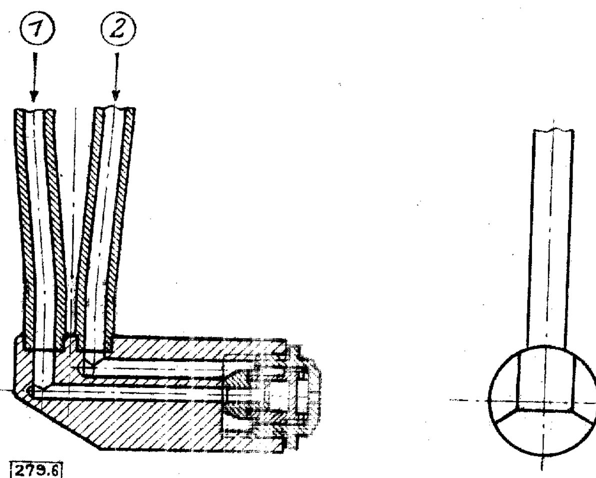


Abb.6 Рис.6

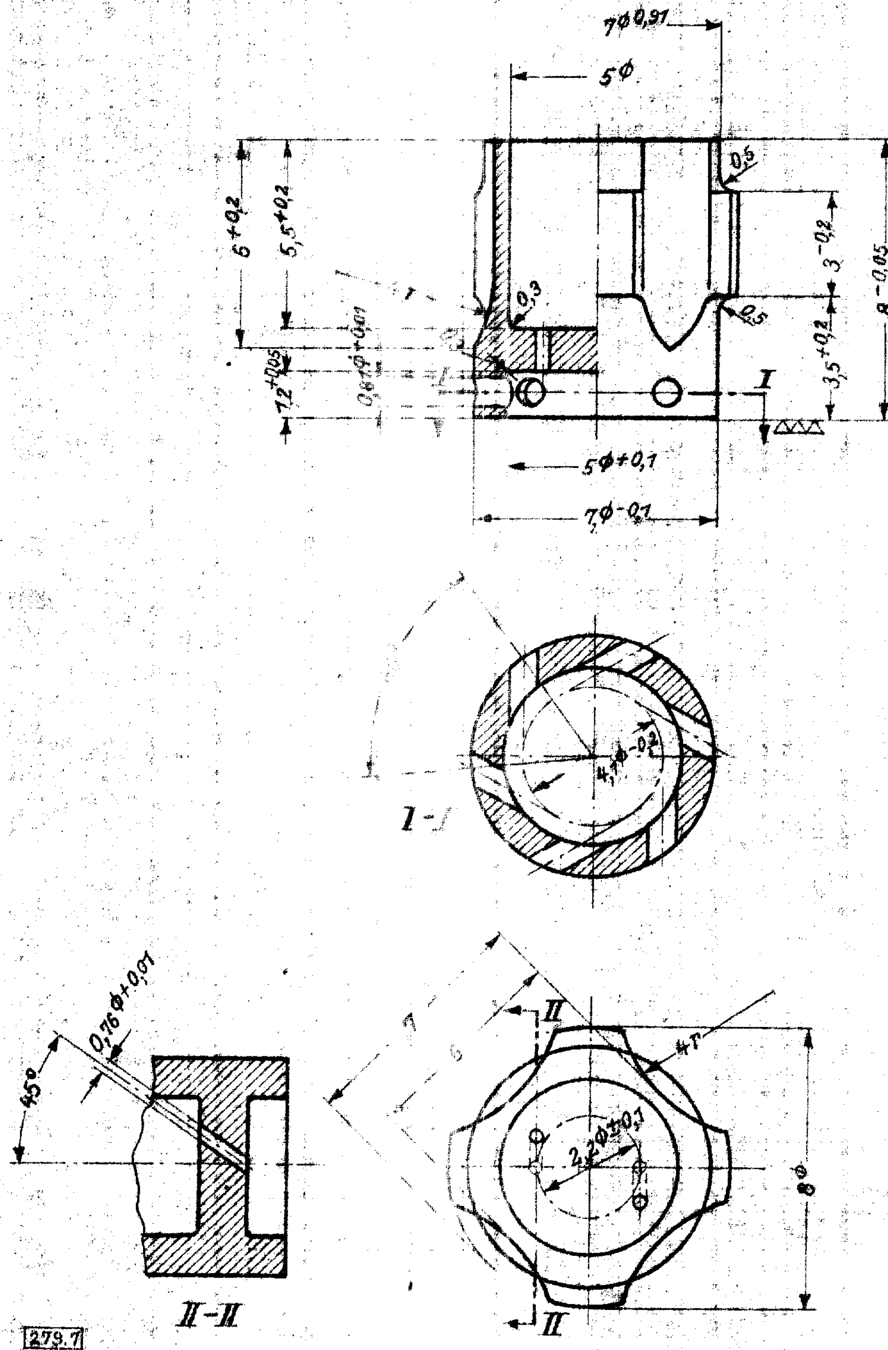


Abb.7 Рис.7

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

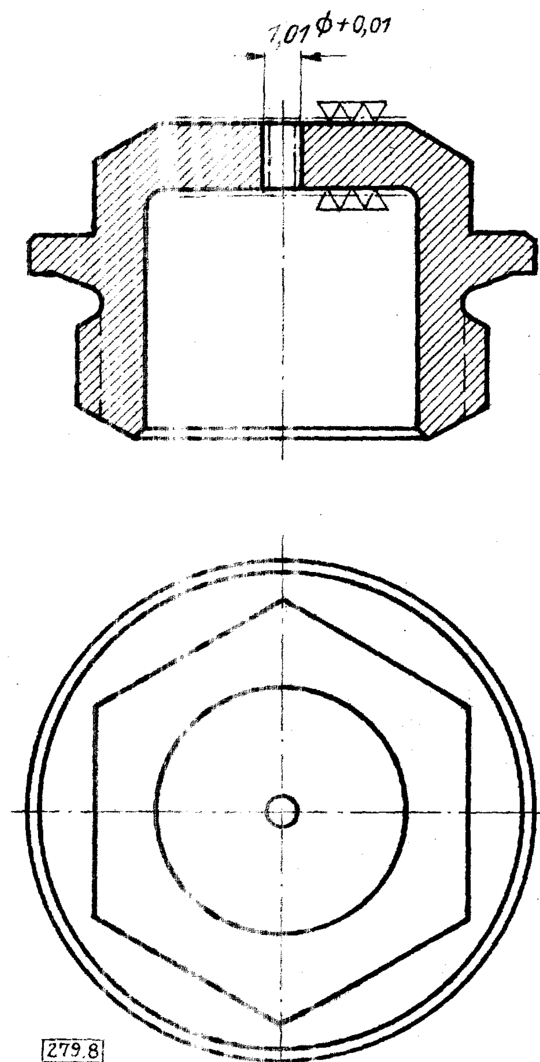


Abb.8 Рис.8

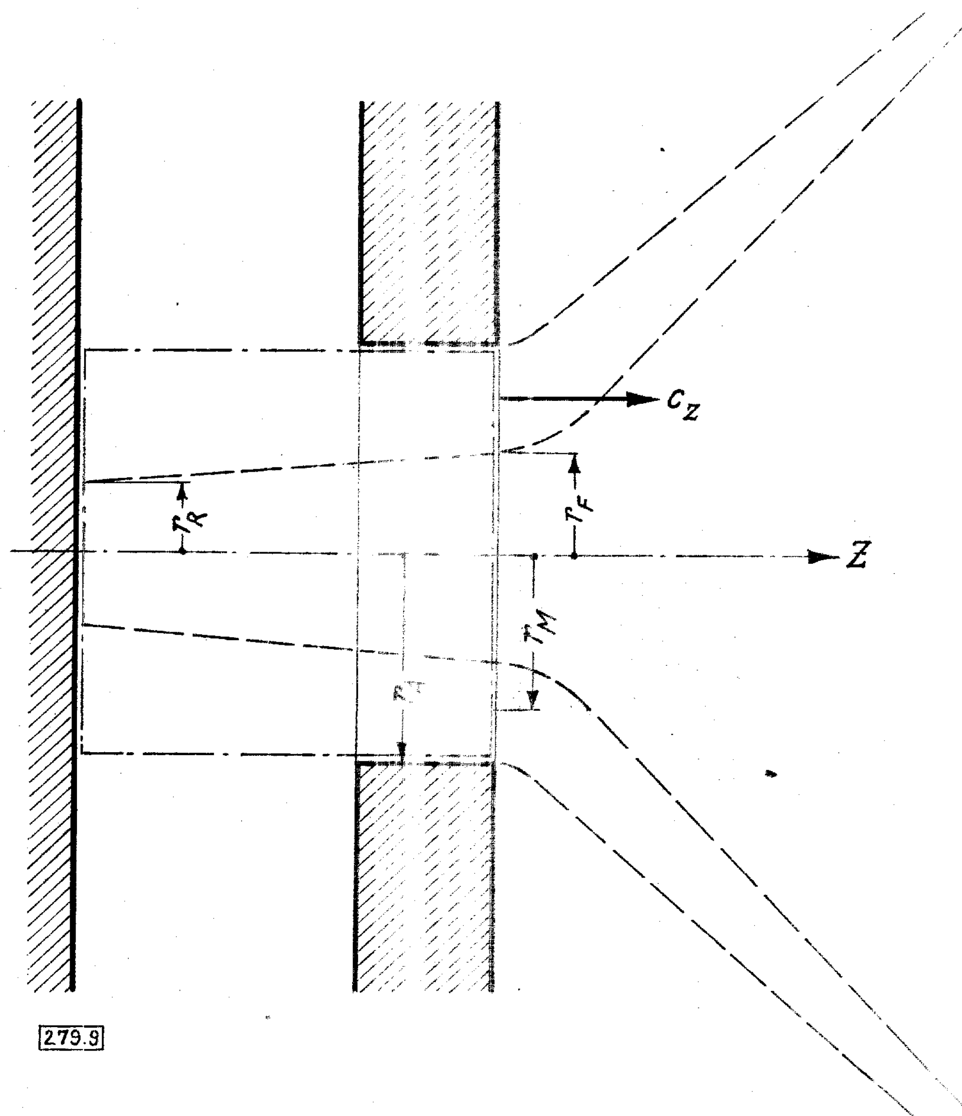
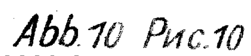


Abb.9 Рис.9

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

279.10


Abb.10 Рис.10

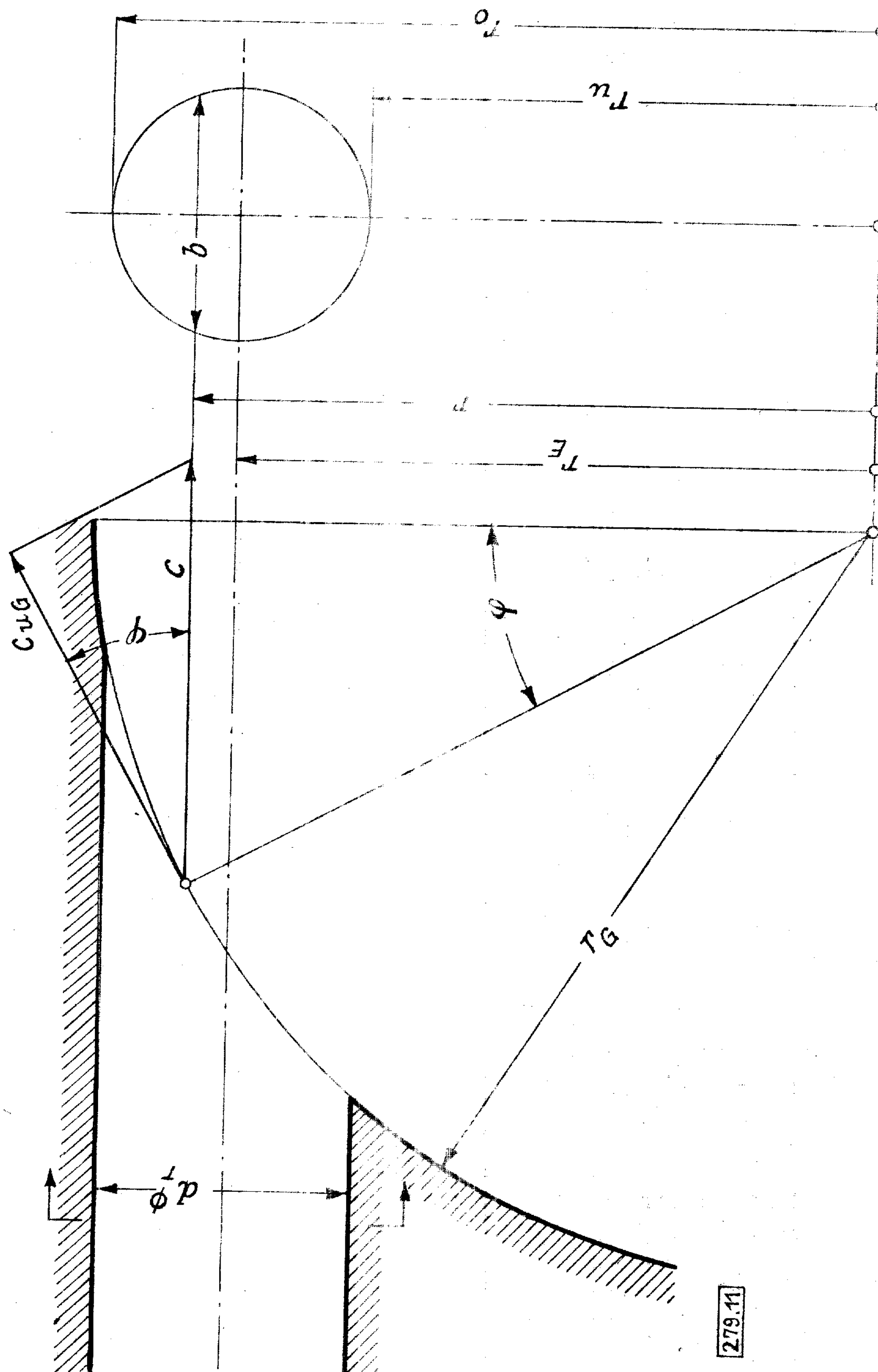


Abb. 11 Рис. 11

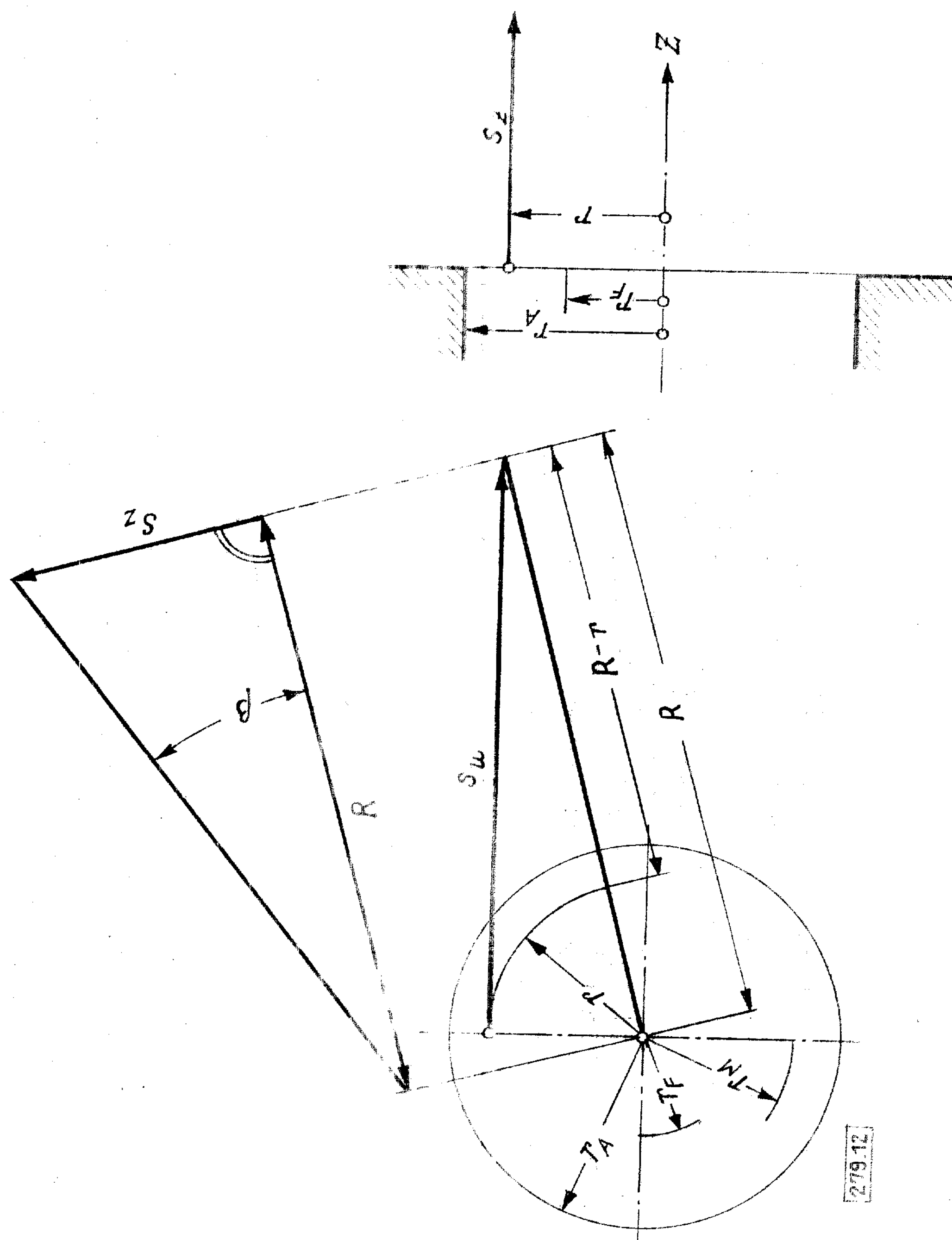
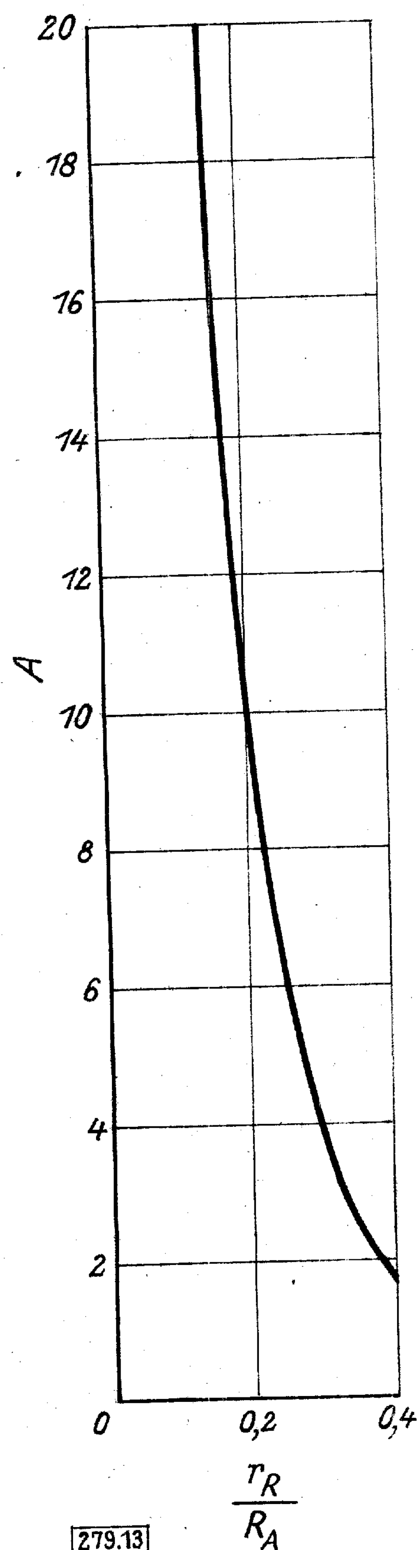


Abb. 12 Рис. 12



1,0 4,0
Z
A
0,9
0,8
3,0
0,7
0,6
Z A
0,5 0,2
0,4
0,3
1,0
A
Z
0,2
0,1
0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0

$\frac{r_R}{R_A}; \frac{R_R}{R_F}$

279.13

Abb. 13 Рис. 13

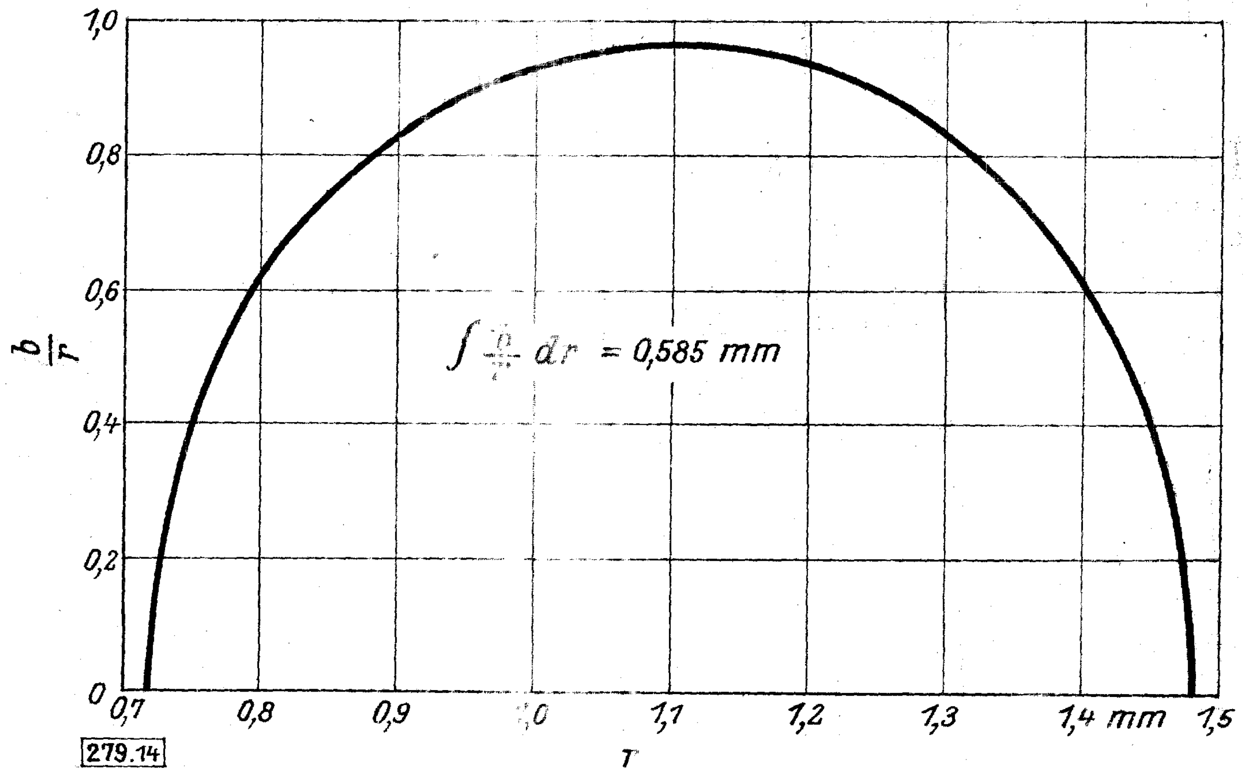


Abb. 14 Рис. 14

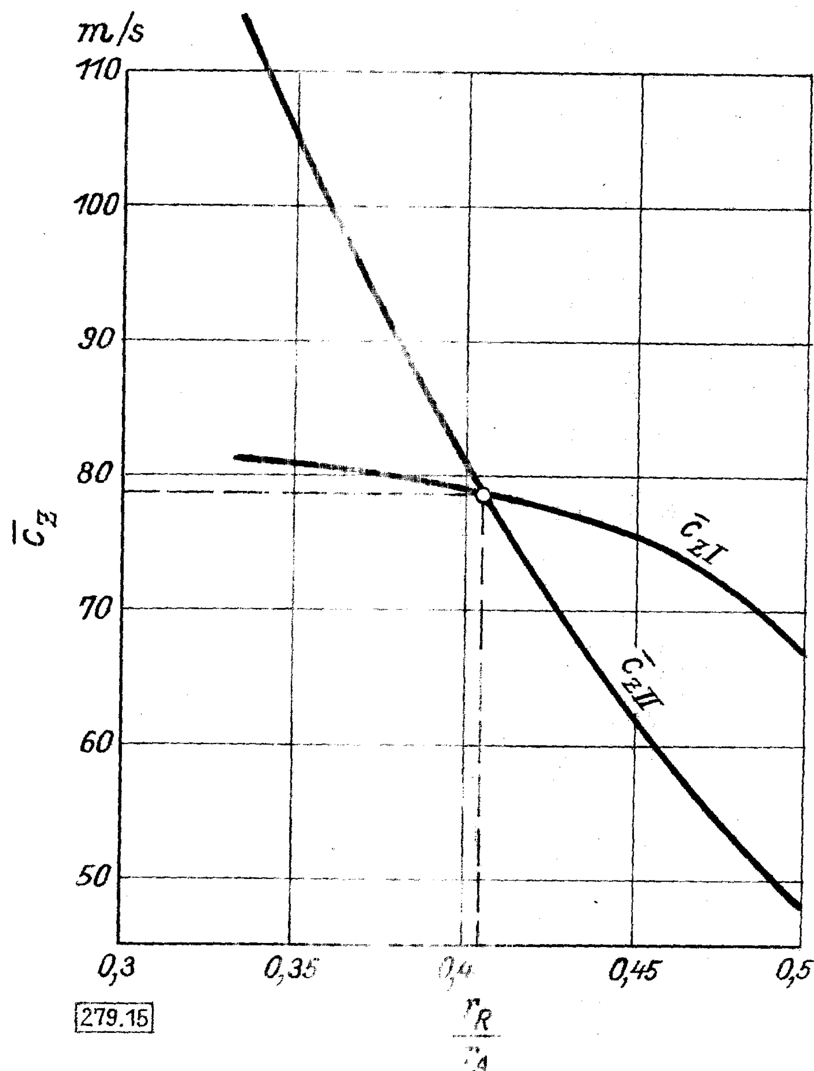


Abb. 15 Рис. 15

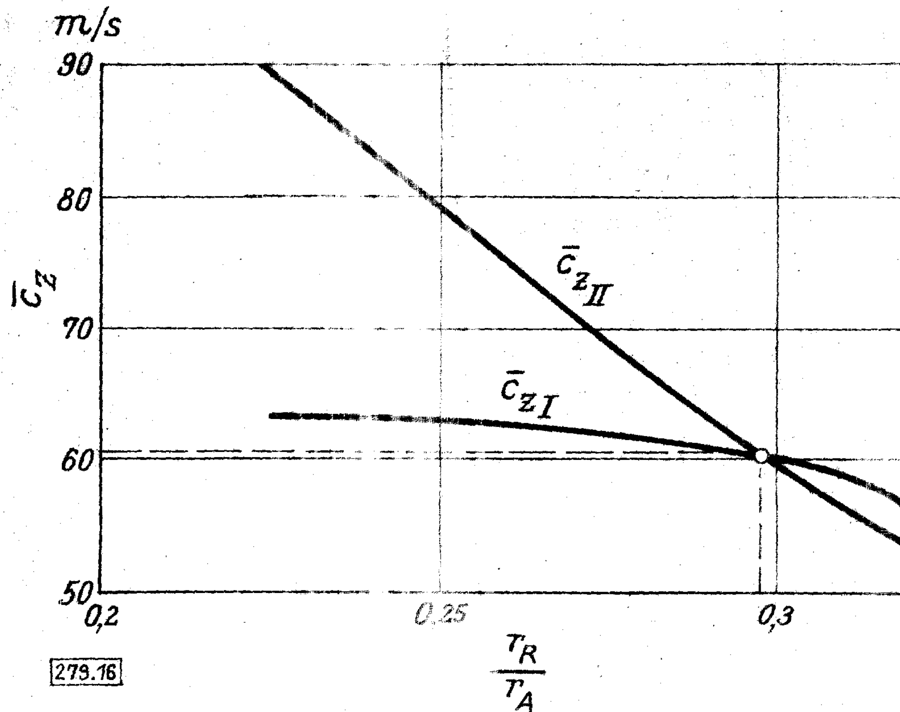


Abb.16 Рис.16

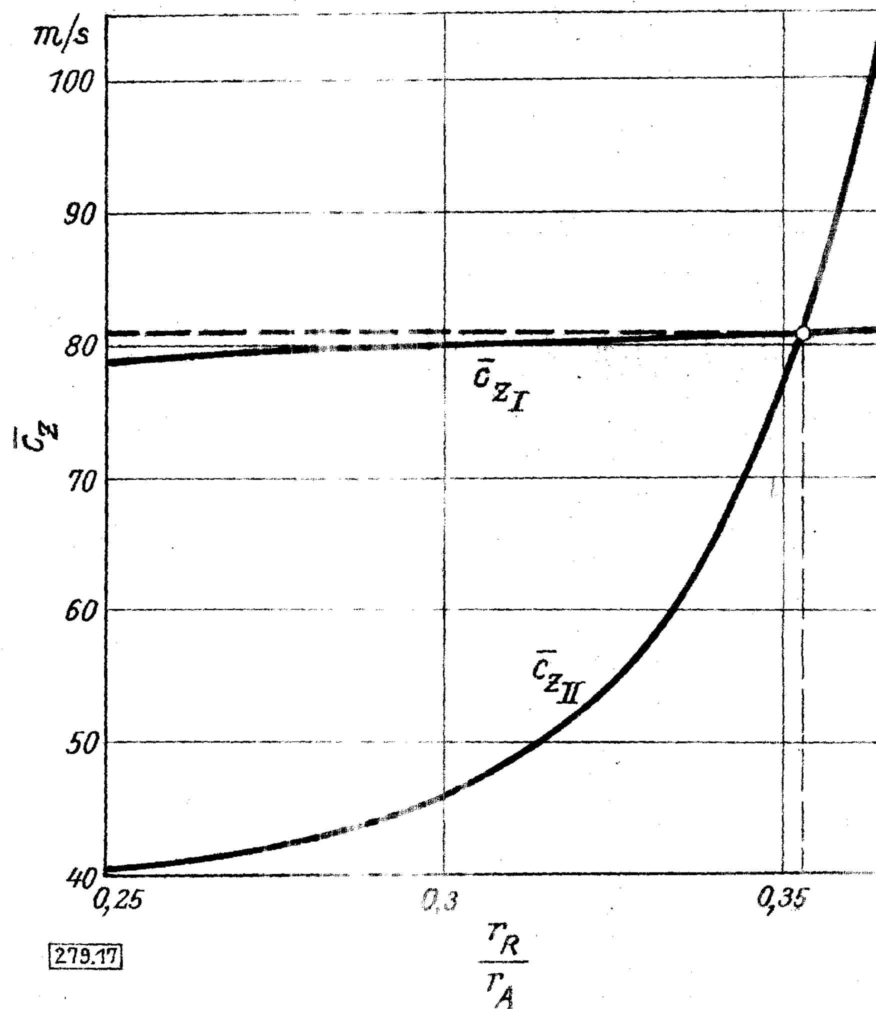


Abb.17 Рис.17

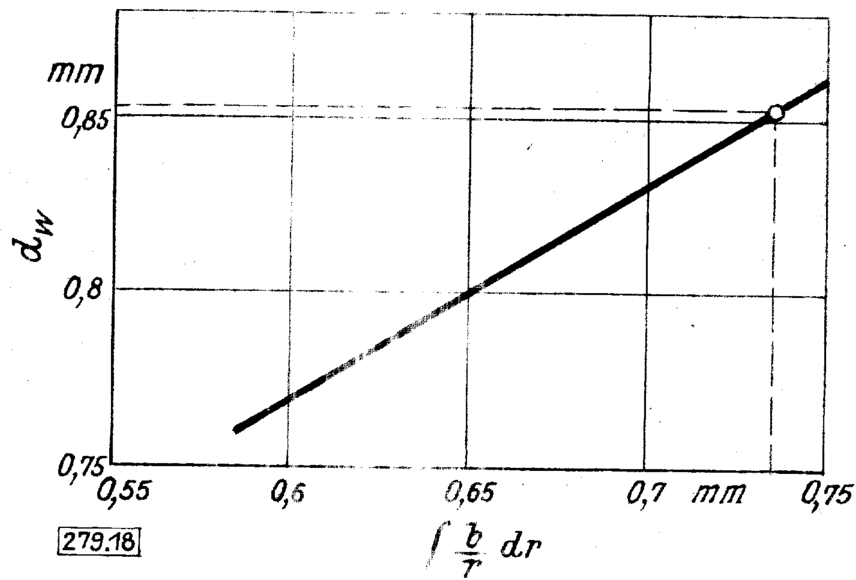
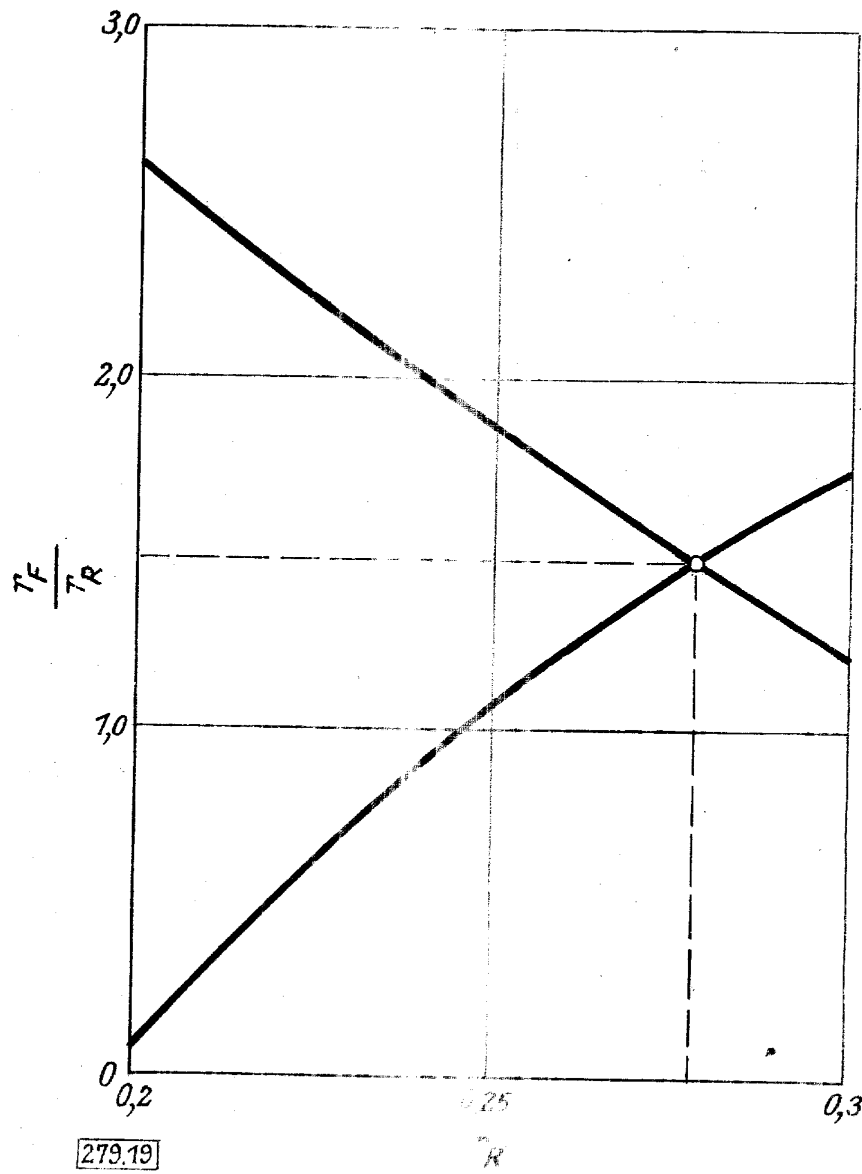
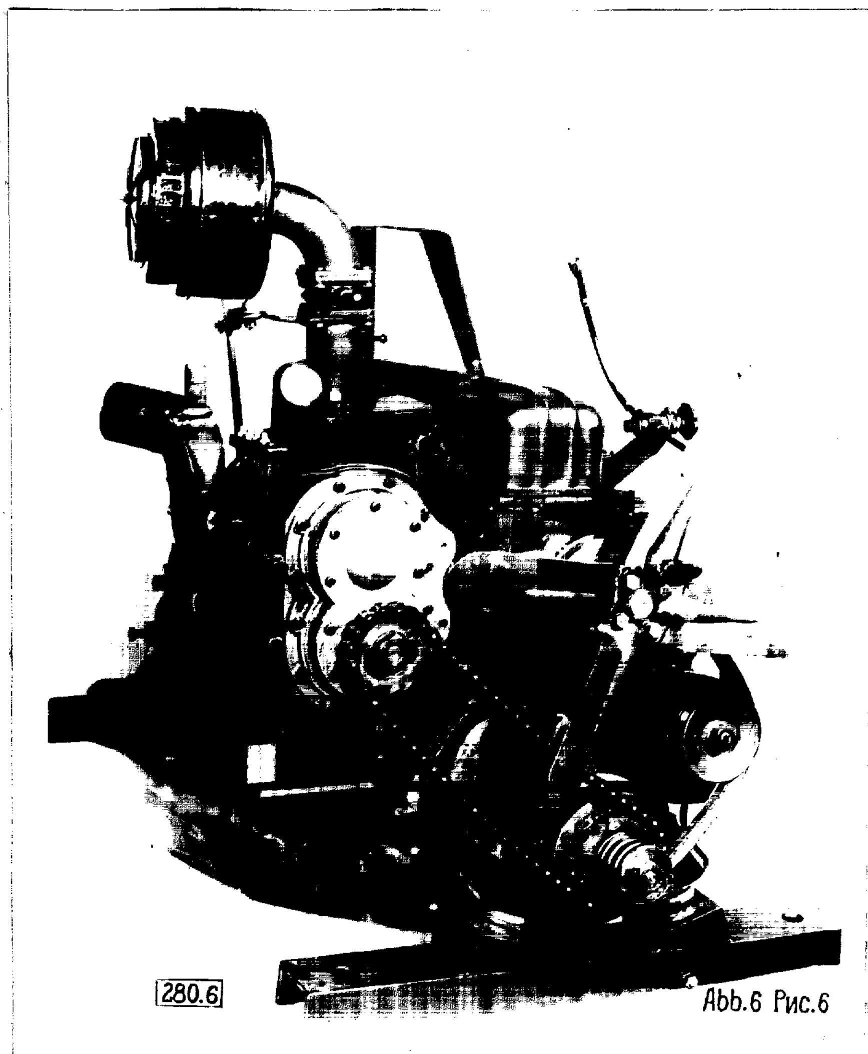


Abb.18 Рис.18



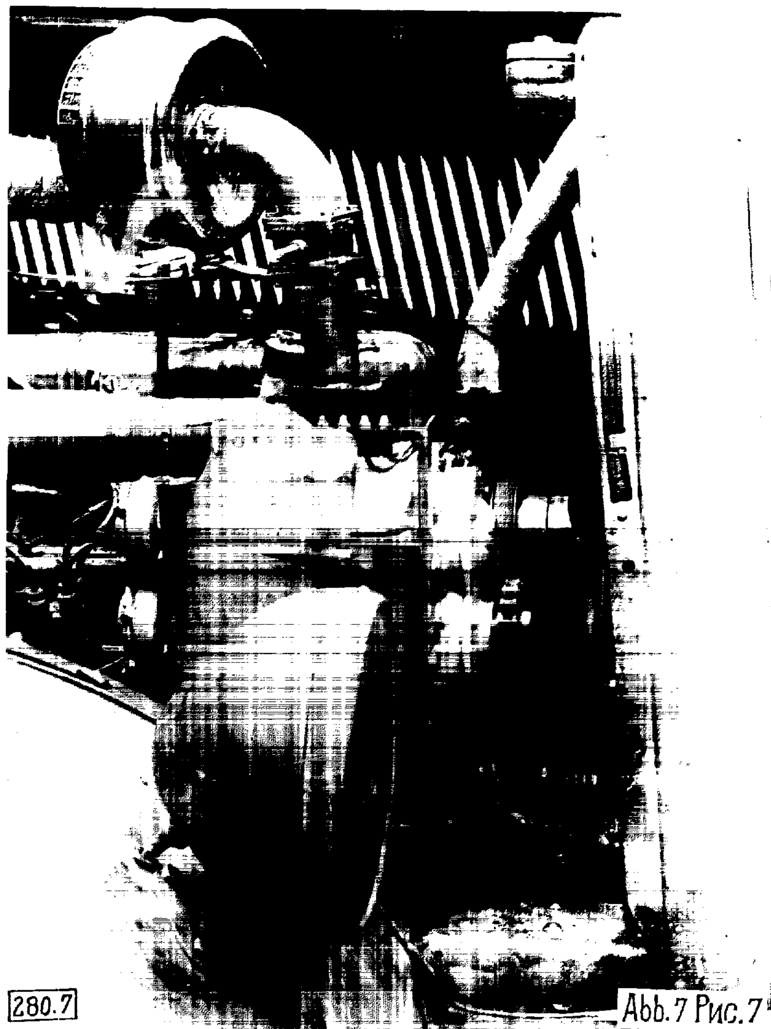
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

Abb.19 Рис.19



280.6

Abb.6 Рис.6



280.7

Abb.7 Рис.7

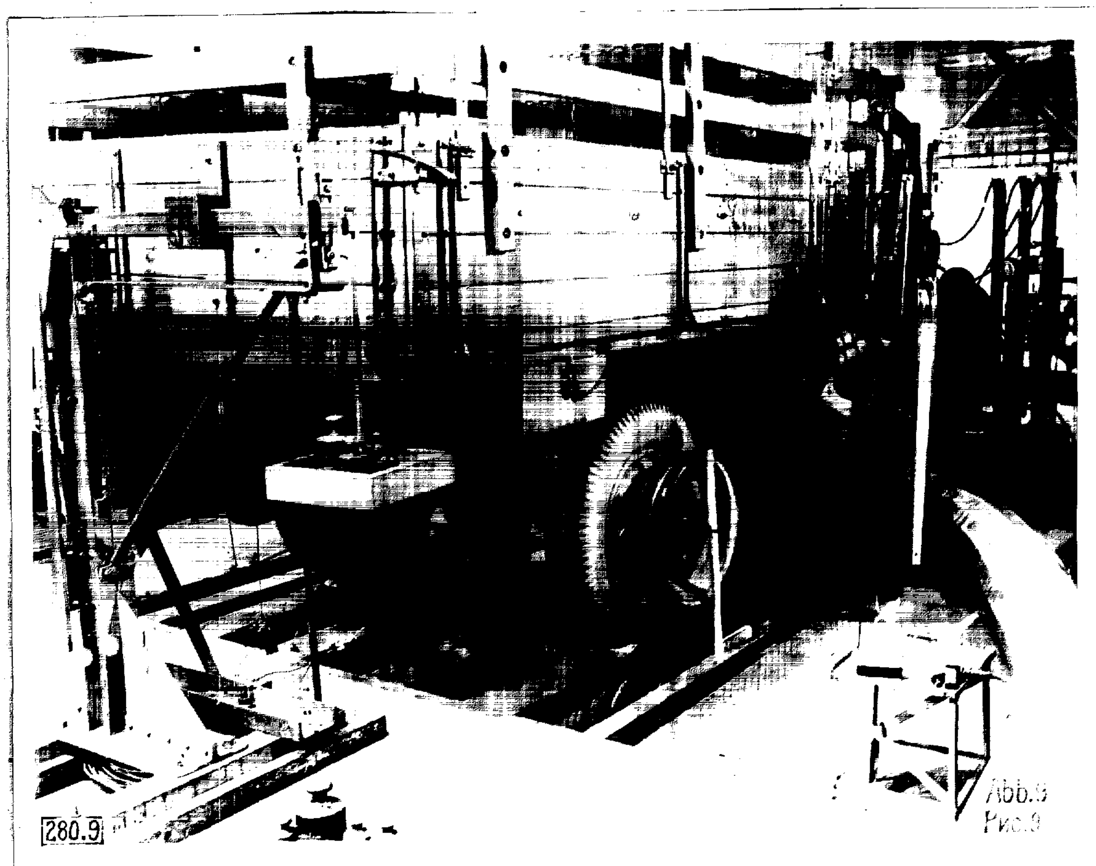


Abb.9
Рис.9

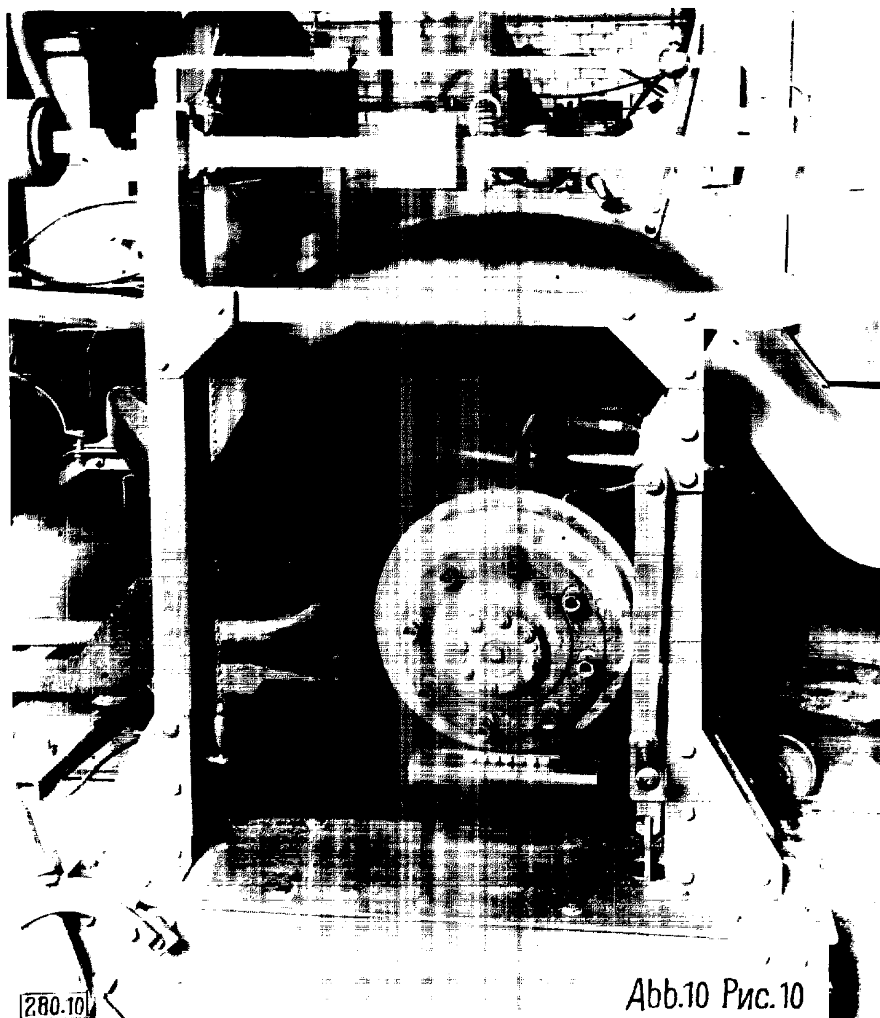


Abb.10 Рис.10

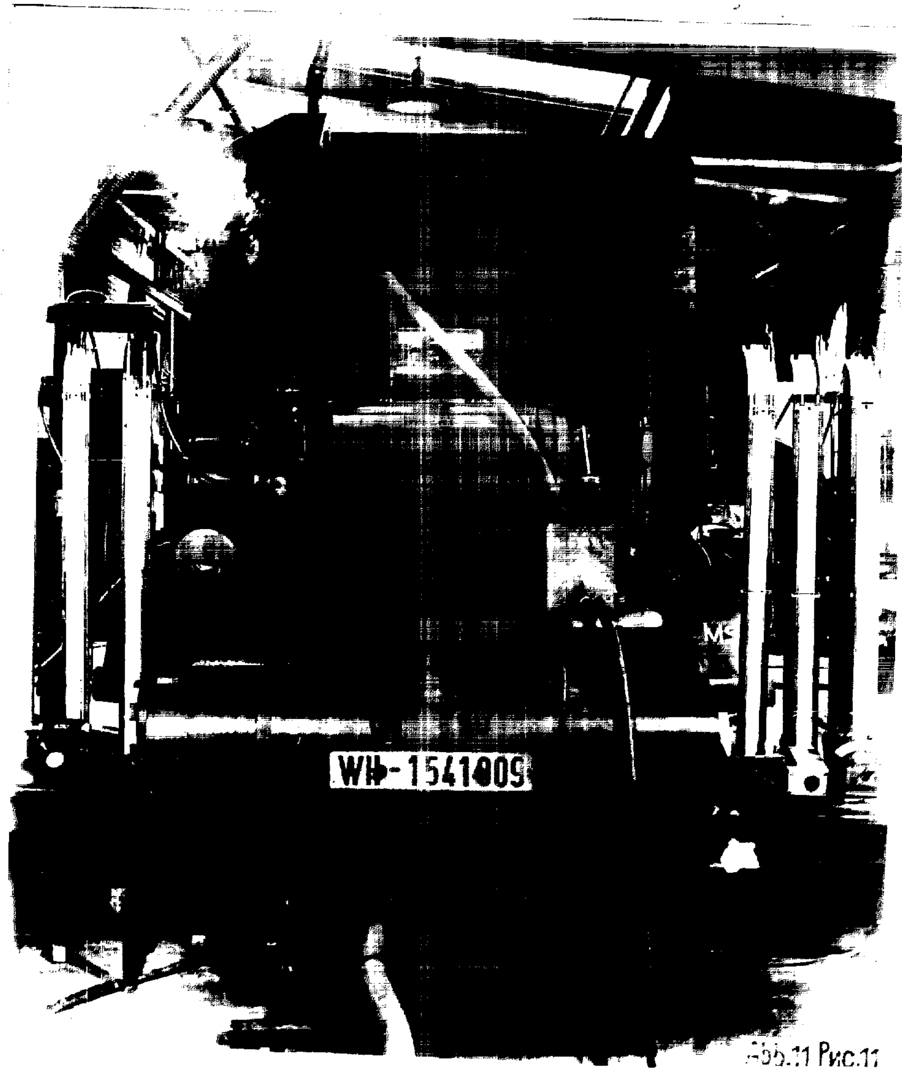


Abb.11 Рис.11

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

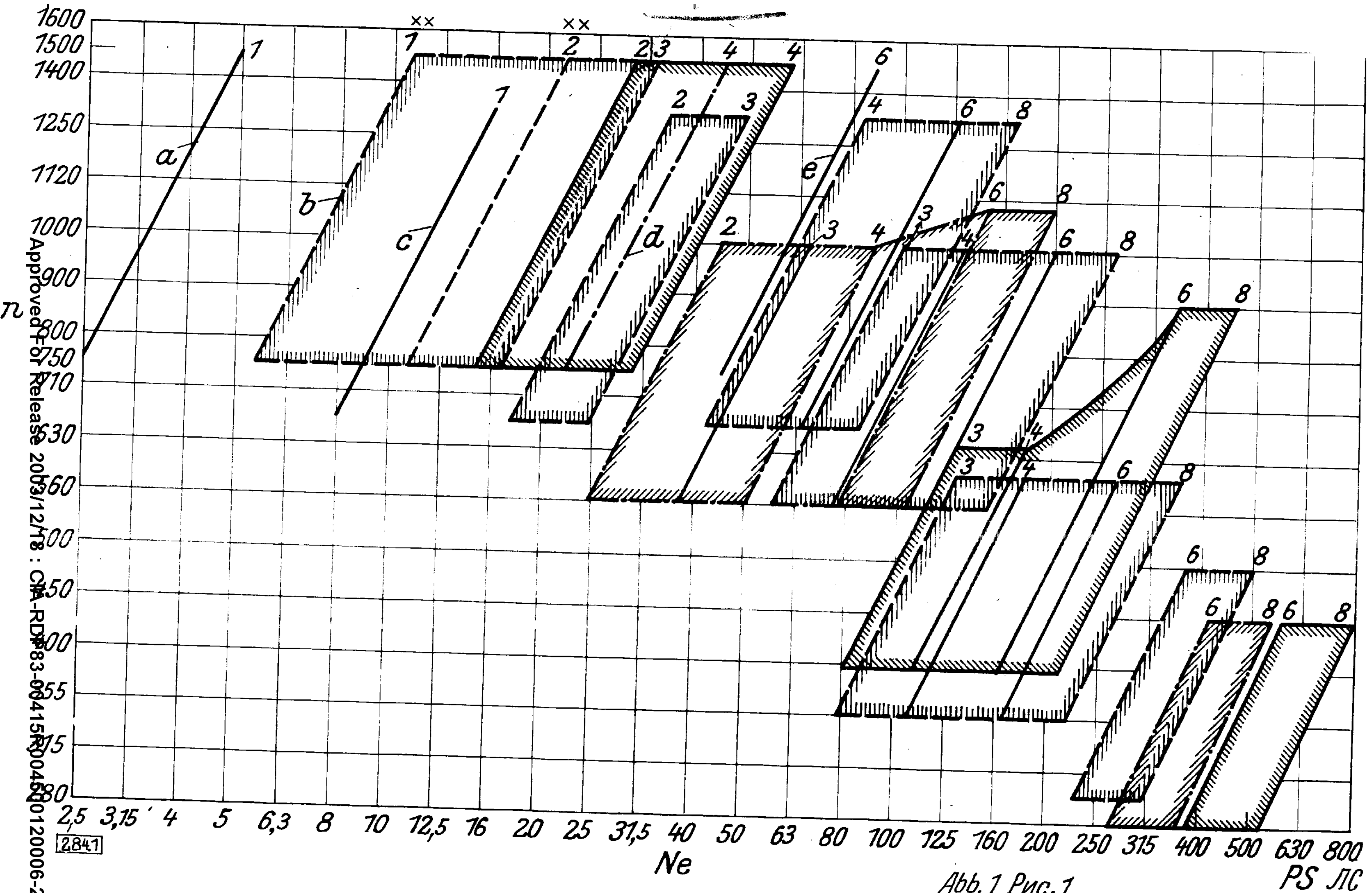

n
1600
1500
1400
1250
1120
1000
900
800
750
710
630
560
500
450
400
355
315
280
Ne
2,5
3,15
4
5
6,3
8
10
12,5
16
20
25
31,5
40
50
63
80
100
125
160
200
250
315
400
500
630
800
PS ЛС
a
b
c
d
e
2841

Abb. 1 Рис. 1

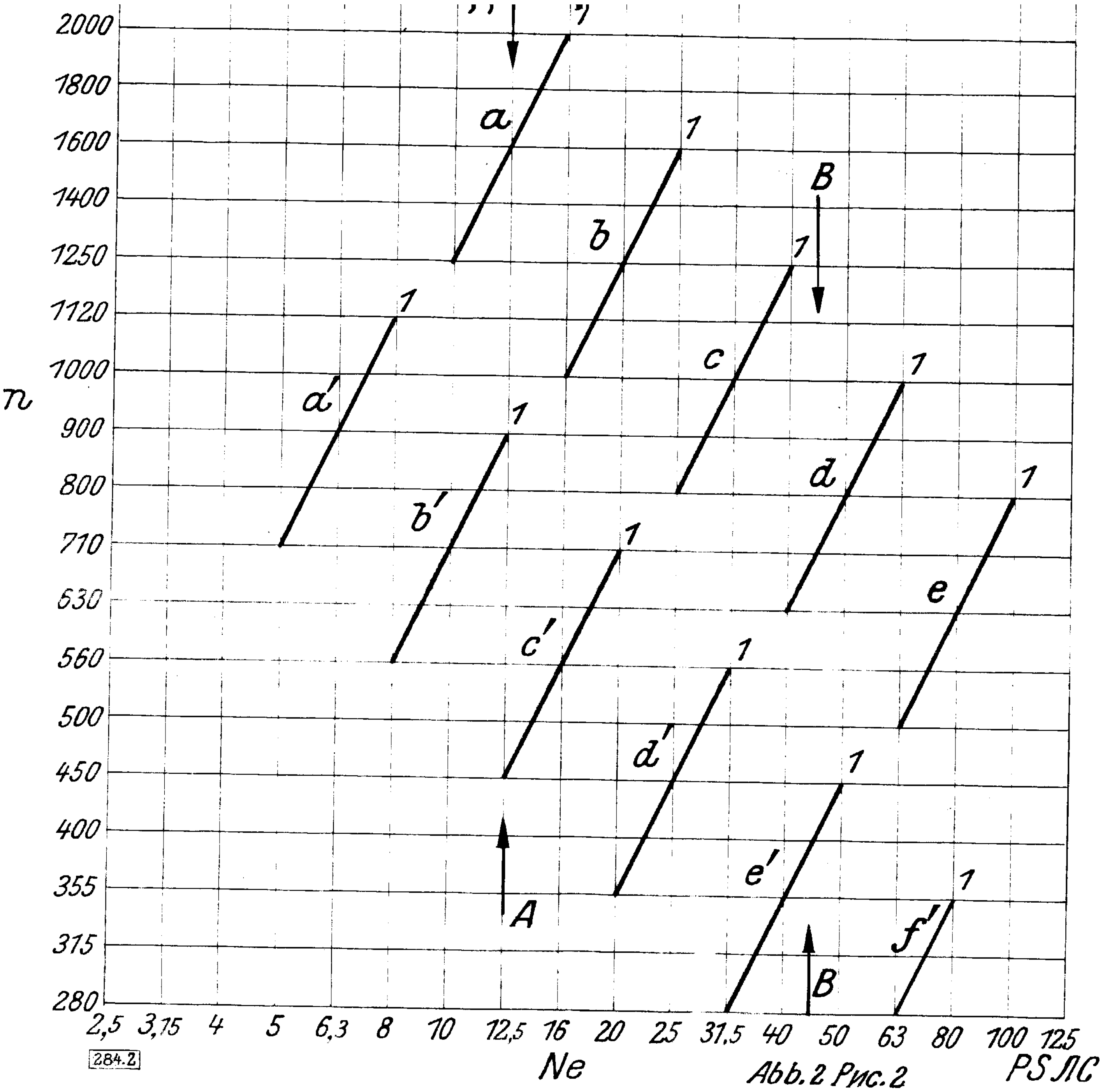

n
2000
1800
1600
1400
1250
1120
1000
900
800
710
630
560
500
450
400
355
315
280
2,5
3,15
4
5
6,3
8
10
12,5
16
20
25
31,5
40
50
63
80
100
125
Ne
PS ЛС
a
b
c
d
e
a'
b'
c'
d'
e'
f'
A
B
1
284.2

Abb. 2 Рис. 2

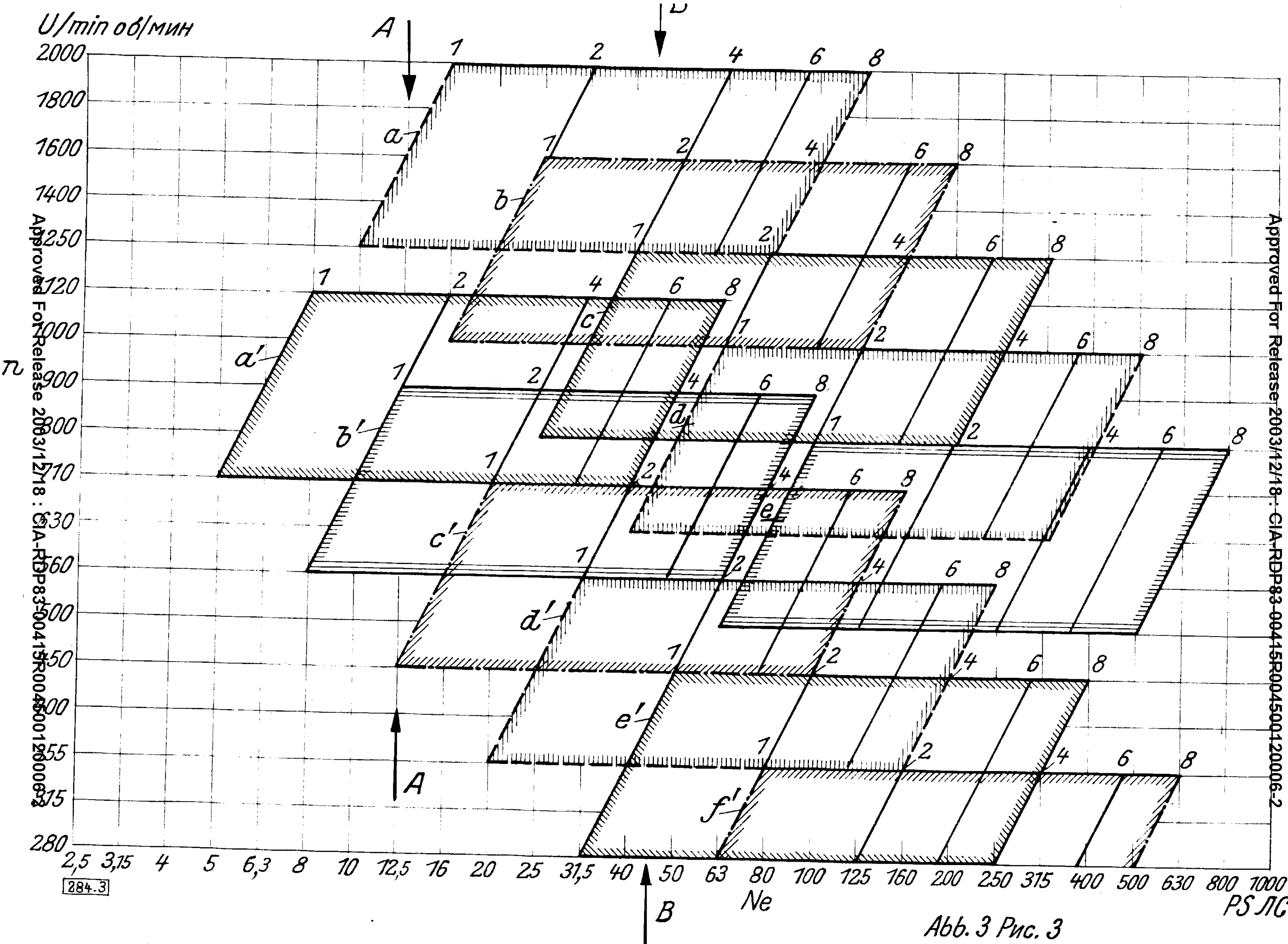


Abb. 3 Рис. 3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

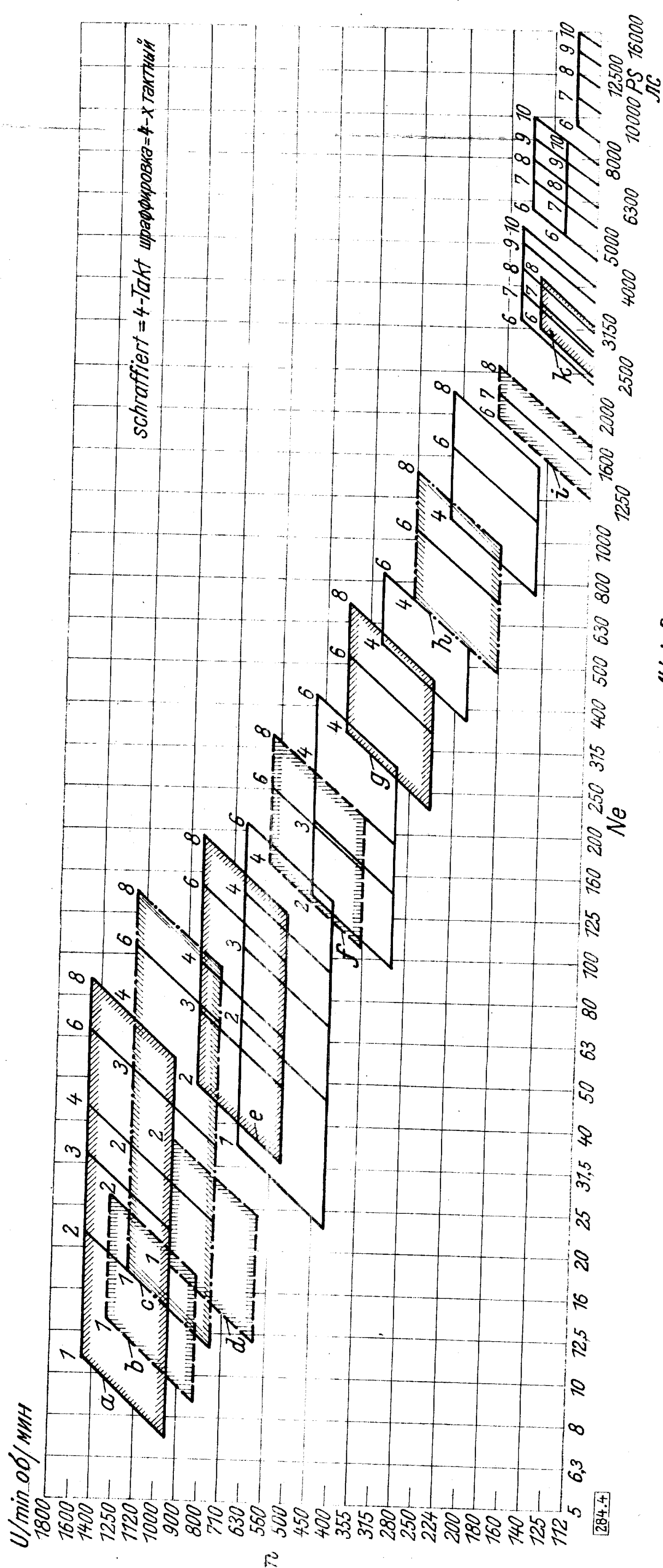
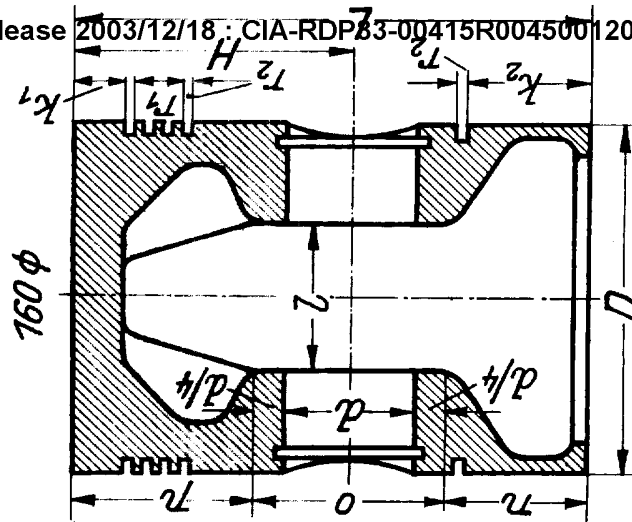
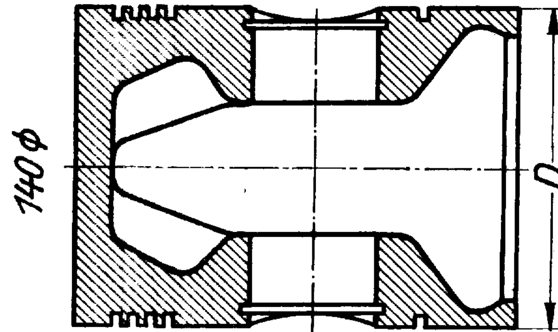
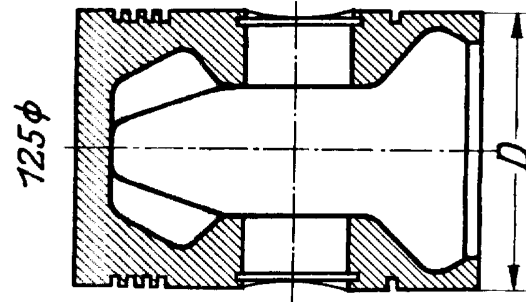
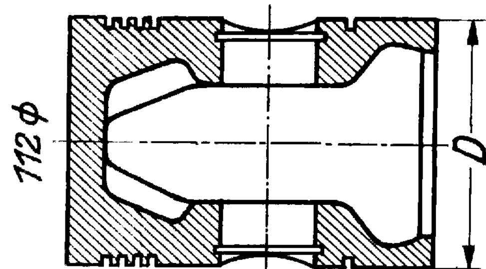

U/min об/мин
1800 1600 1400 1250 1120 1000 900 800 710 630 560 500 450 400 355 315 280 250 224 200 180 160 140 125 112
5 6,3 8 10 12,5 16 20 25 31,5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000
Ne
PS лс
schraffiert = 4-Takt штрафировка=4-х тактный
a b c d e f g h i k
284.4

Abb.4 Рис.4









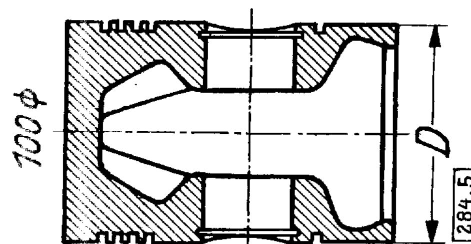
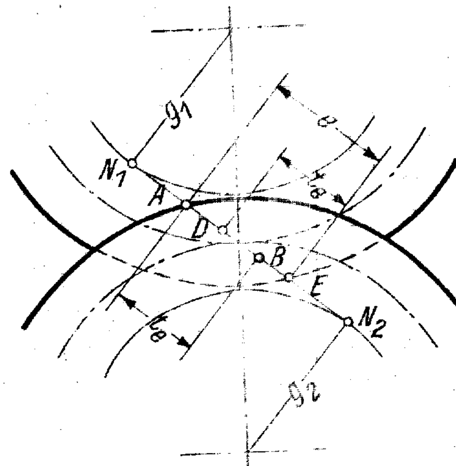


Abb. 5 Рис. 5

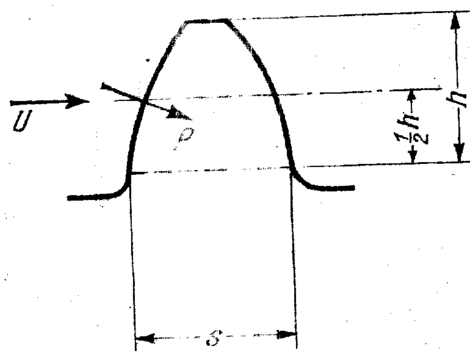
Abb. 5.

284.5



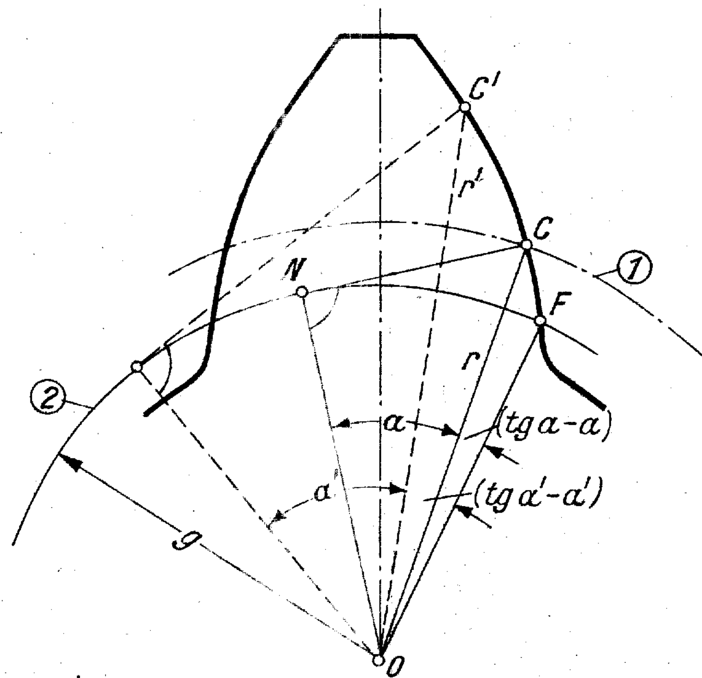
285.1

Abb.1 РИС.1



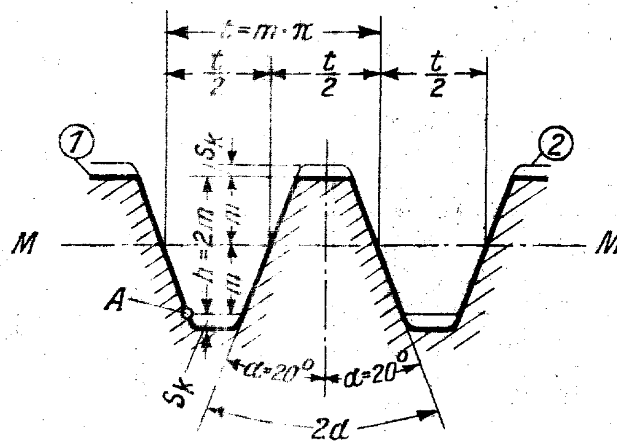
285.2

Abb.2 РИС.2



285.4

Abb.4 РИС.4



285.3

Abb.3 РИС.3

285.5

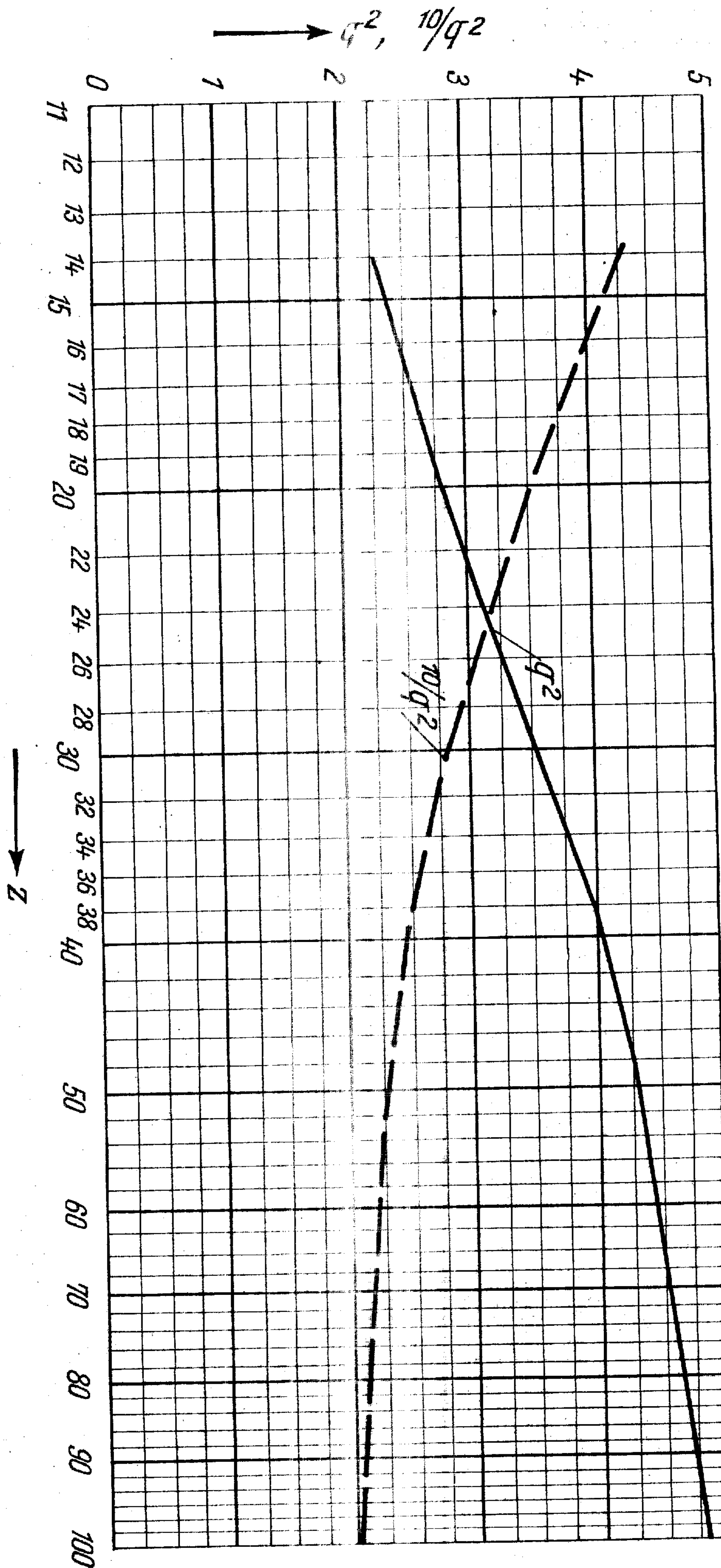
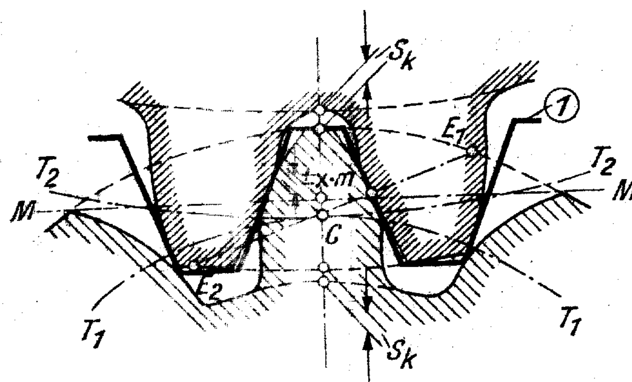
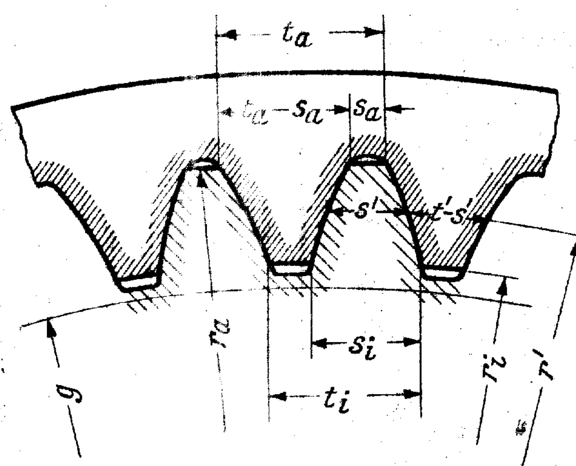


Abb.5 Рис.5



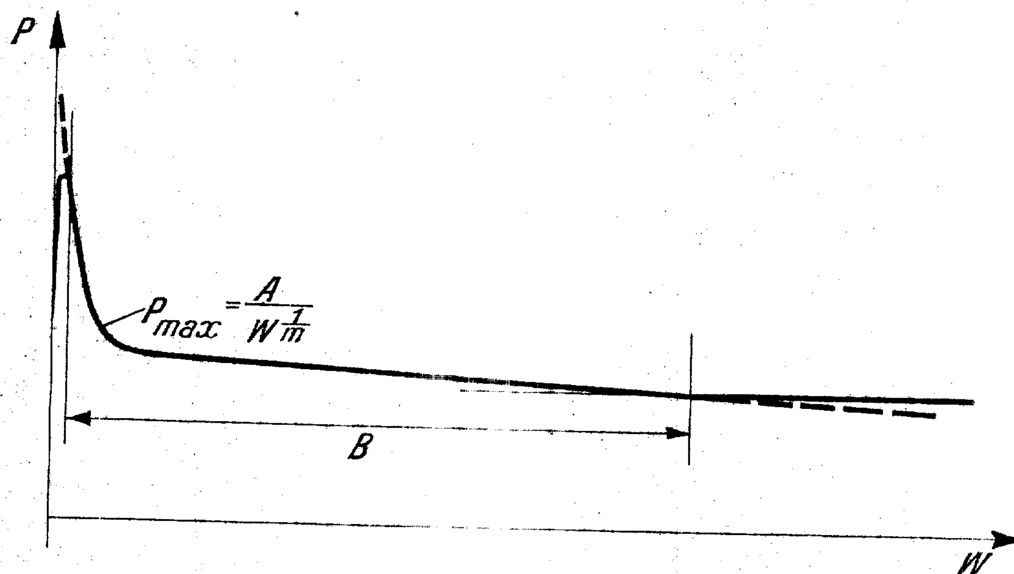
285.6

Abb.6 Рис.6



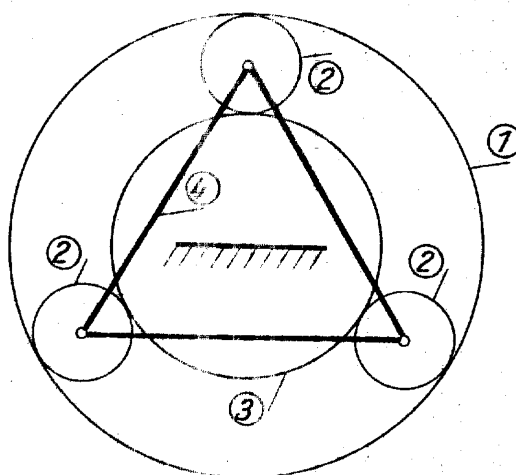
285.7

Abb.7 Рис.7



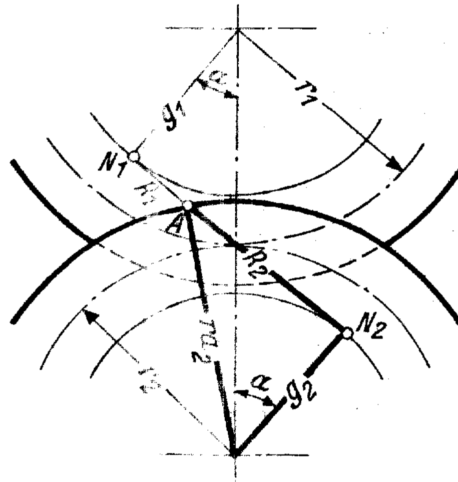
285.9

Abb.9 РИС.9



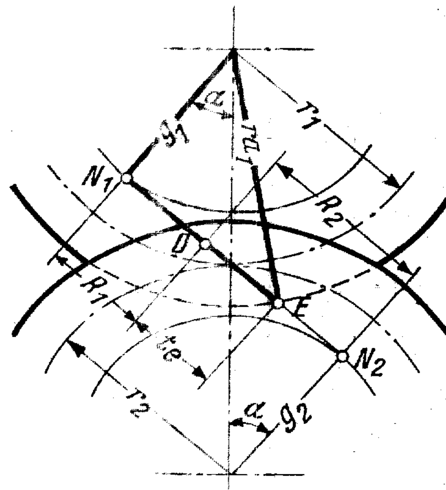
285.8

Abb. 8 РИС. 8



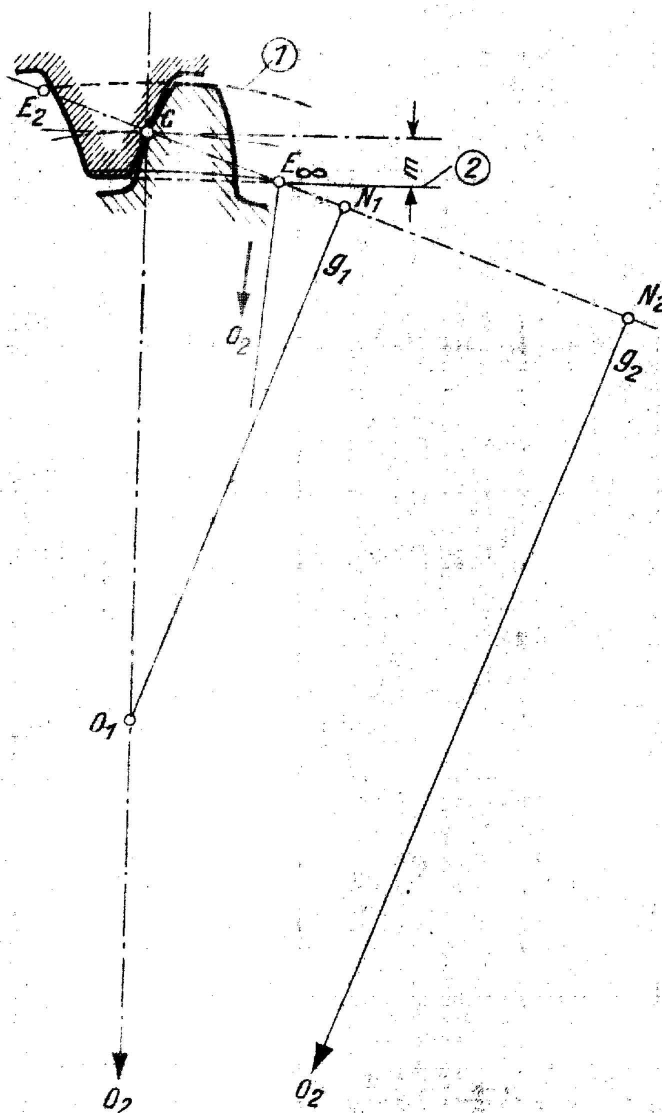
285.10

Abb.10 Рис.10



285.11

Abb.11 Рис.11



285.12

Abb. 12 РИС. 12

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

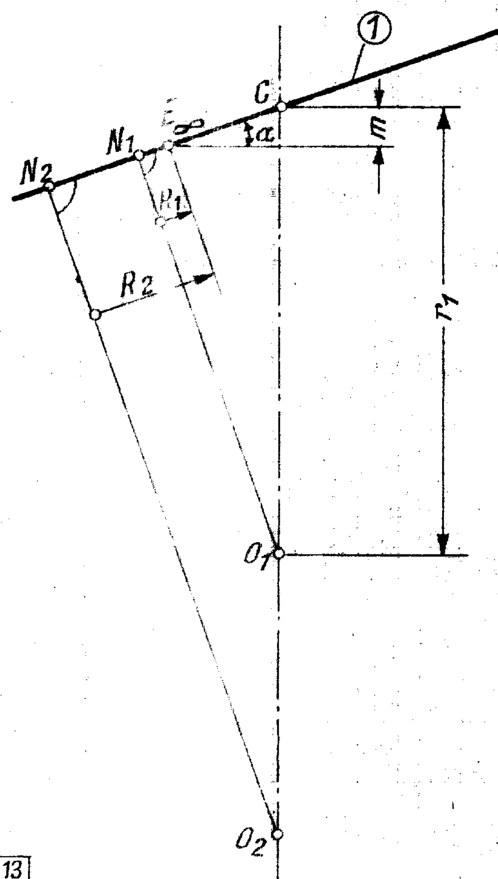


Abb. 13 PИC. 13

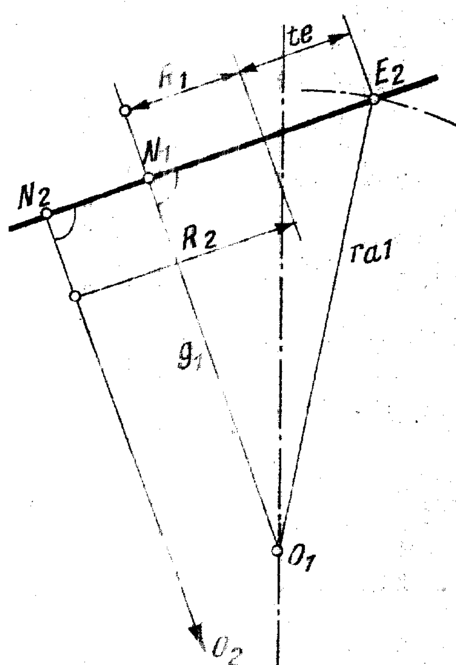
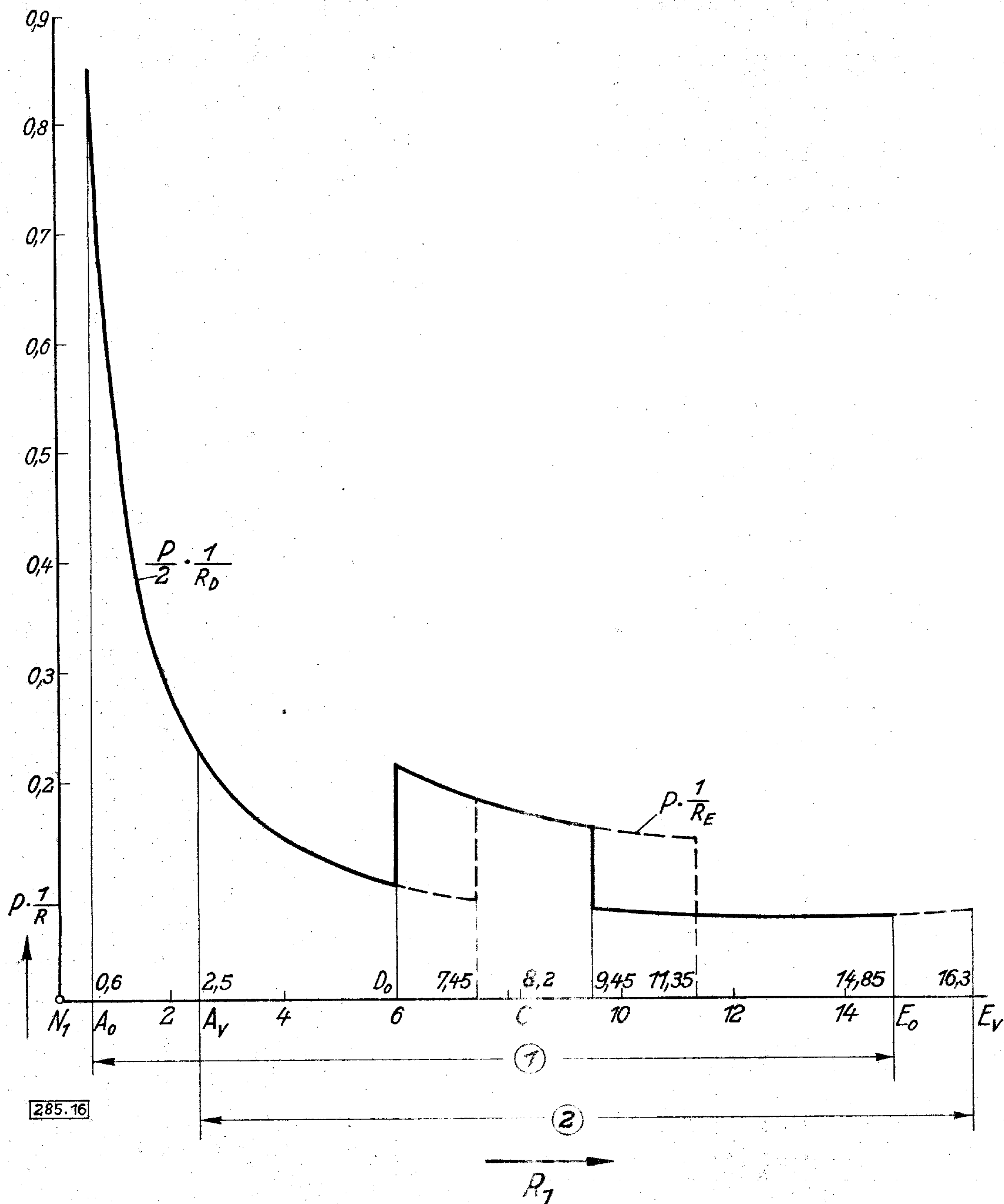


Abb. 14 PИC. 14

285.15

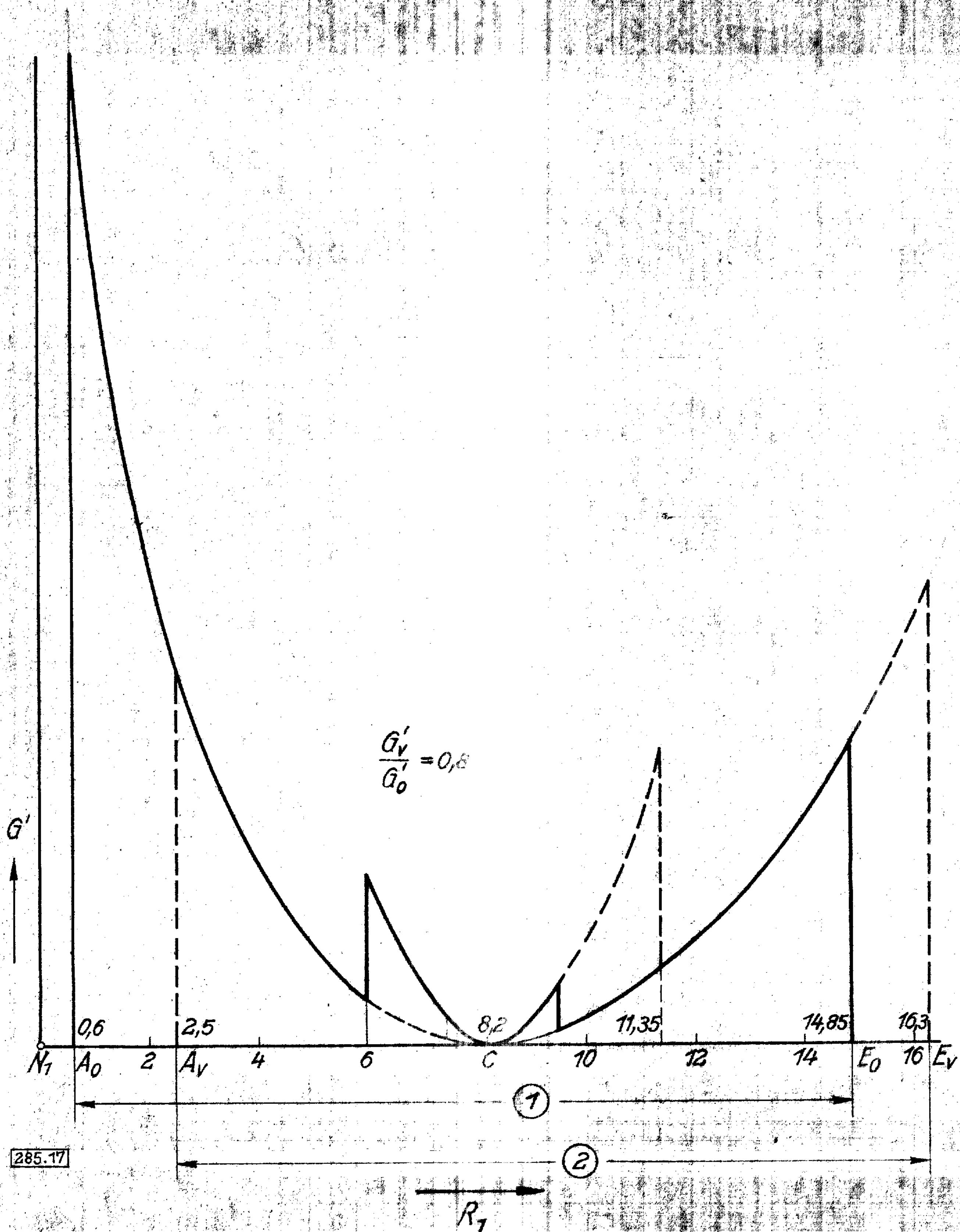
Abb. 15 РИС. 15

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
P/2 · 1/R_D
p · 1/R_E
p · 1/R
0,6
2,5
D_0
7,45
8,2
9,45
11,35
14,85
16,3
N_1
A_0
2
A_V
4
6
C
10
12
14
E_0
E_V
1
2
285.16
R_1

Abb. 16 Рис. 16



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

Abb. 17 Рис. 17

Formeln für die Krümmungszahlen an Null- und V-Nullrädern
формулы коэфициента кривизны нулевых и V-нулевых зубчатых колес

Nullräder / нулевые зубчатые колеса	Außen-Getriebe / внешнее сцепление	$R_2 = r_1 \cdot \sqrt{i^2 \cdot \sin^2\alpha + \frac{4i}{z_1} + \frac{4}{z_1^2}}$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_2\left[(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha - R_2\right]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[\sqrt{\sin^2\alpha + \frac{4}{z_1} + \frac{4}{z_1^2}} - \frac{2\pi\cdot\cos\alpha}{z_1}\right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha - R_1\right]}$
	Jnnen-Getriebe / внутреннее сцепление	$R_1 = m \cdot \left(\frac{z_1}{2}\sin\alpha - \frac{1}{\sin\alpha}\right)$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha + R_1\right]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[\sqrt{\sin^2\alpha + \frac{4}{z_1} + \frac{4}{z_1^2}} - \frac{2\pi\cdot\cos\alpha}{z_1}\right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha + R_1\right]}$
V-Nullräder / V-нуль-зубчатые колеса	Außen-Getriebe / внешнее сцепление	$R_2 = r_1 \cdot \sqrt{i^2 \cdot \sin^2\alpha + \frac{4i}{z_1}(1-x) + \frac{4}{z_1^2}(1-x)^2}$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_2\left[(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha - R_2\right]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[\sqrt{\sin^2\alpha + \frac{4}{z_1}(1+x) + \frac{4}{z_1^2}(1+x)^2} - \frac{2\pi\cdot\cos\alpha}{z_1}\right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i+1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha - R_1\right]}$
	Jnnen-Getriebe / внутреннее сцепление	$R_1 = m \cdot \left[\frac{z_1}{2}\sin\alpha - \frac{(1-x)}{\sin\alpha}\right]$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha + R_1\right]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[\sqrt{\sin^2\alpha + \frac{4}{z_1}(1+x) + \frac{4}{z_1^2}(1+x)^2} - \frac{2\pi\cdot\cos\alpha}{z_1}\right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{R_1\left[(i-1)\cdot r_1 \cdot \sin\alpha + R_1\right]}$

285.2t5

Zahlentafel 5 / Таблица 5

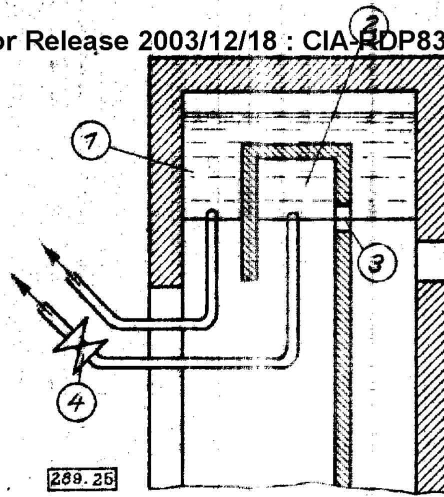


Abb. 25 Рис. 25

289.26

Abb. 26 Рис. 26

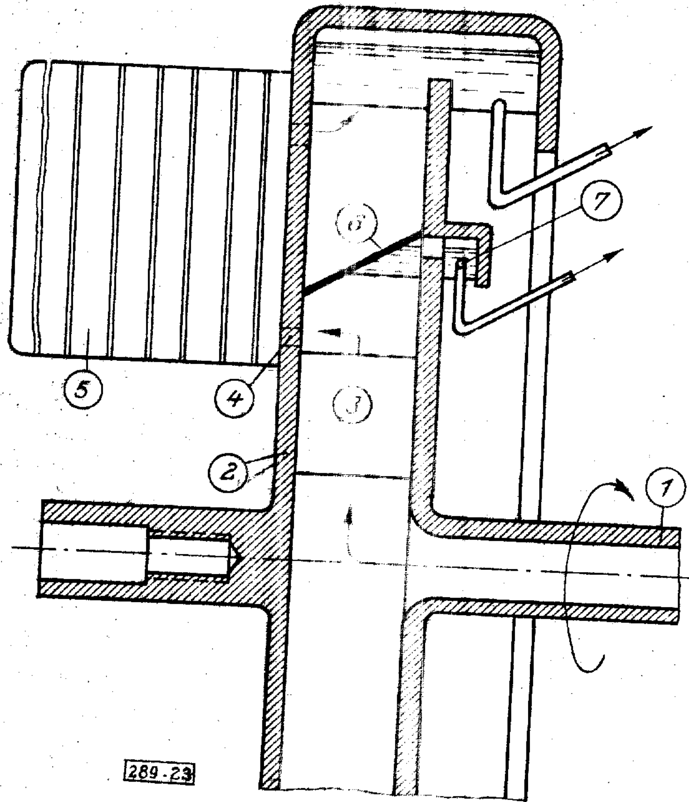


Abb. 23 Рис. 23

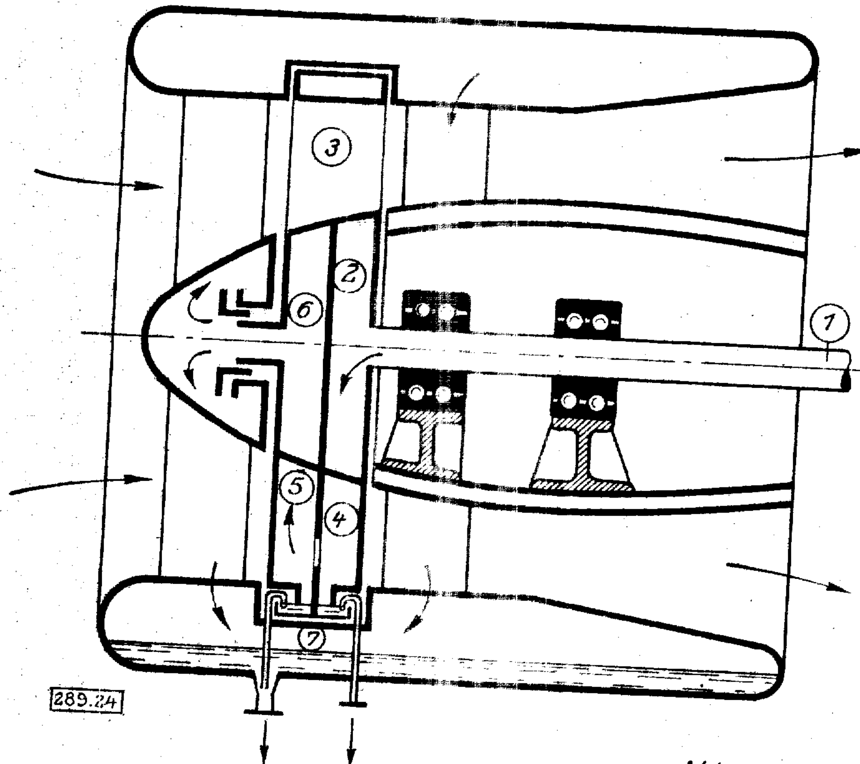


Abb. 24 Рис. 24

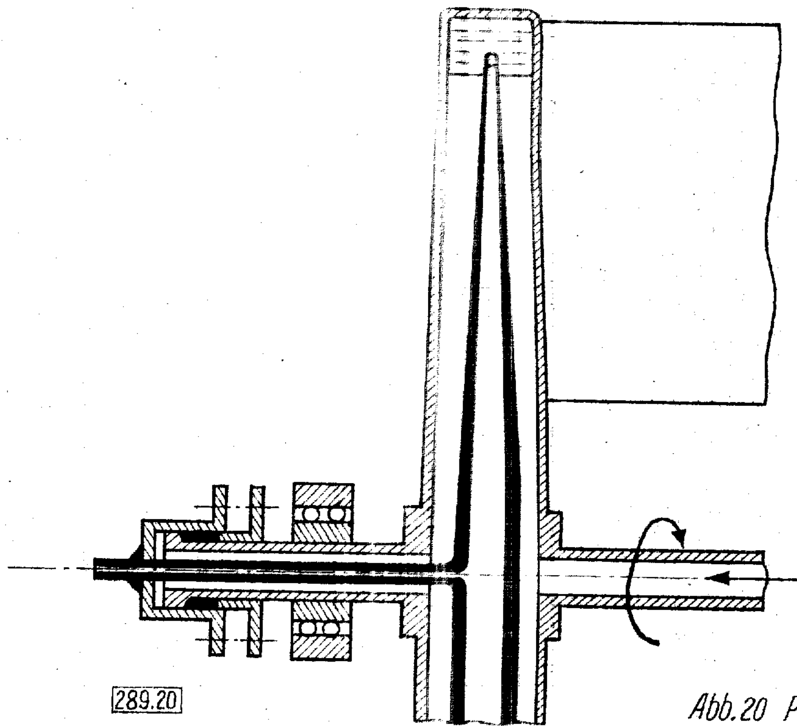


Abb.20 Рис.20

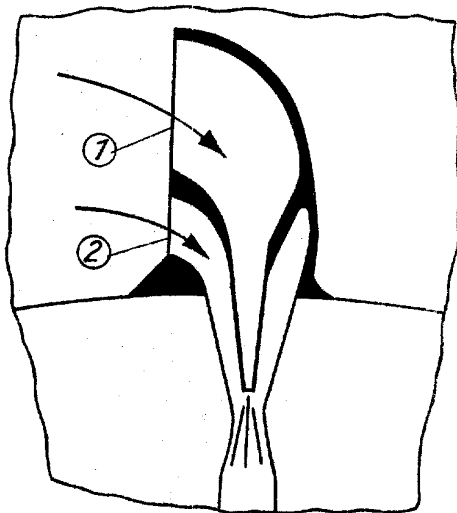


Abb.21 Рис.21

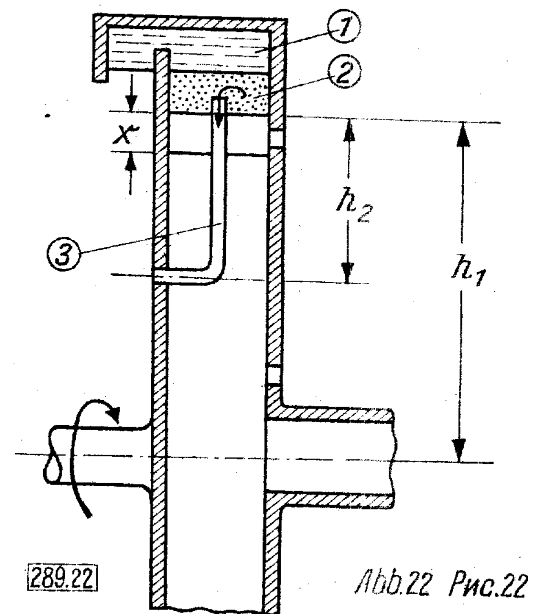
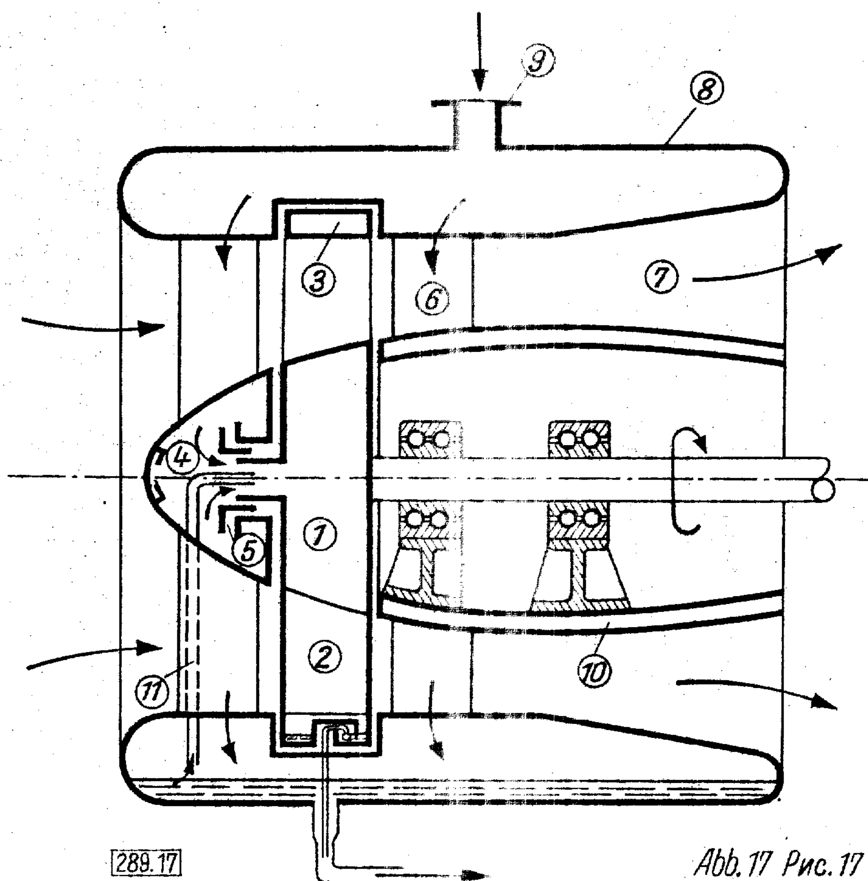
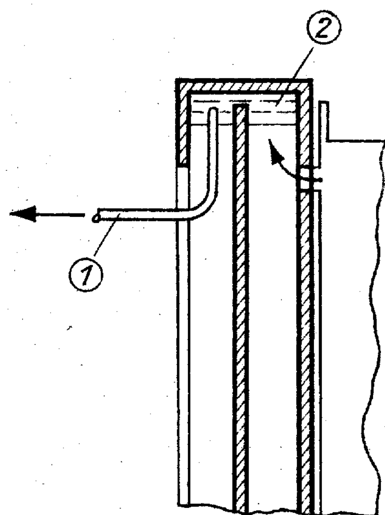


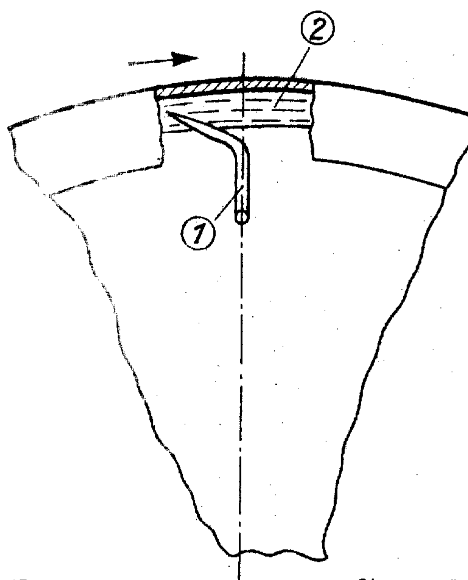
Abb.22 Рис.22



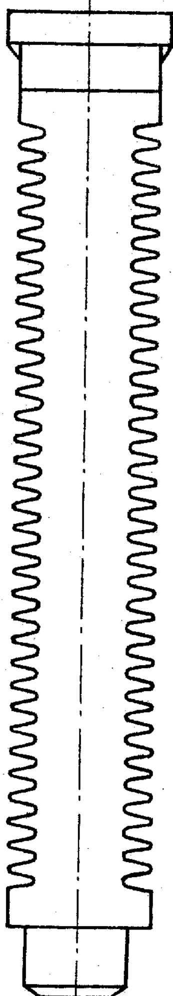
289.17 Abb. 17 Рис. 17



289.18 Abb. 18 РИС. 18

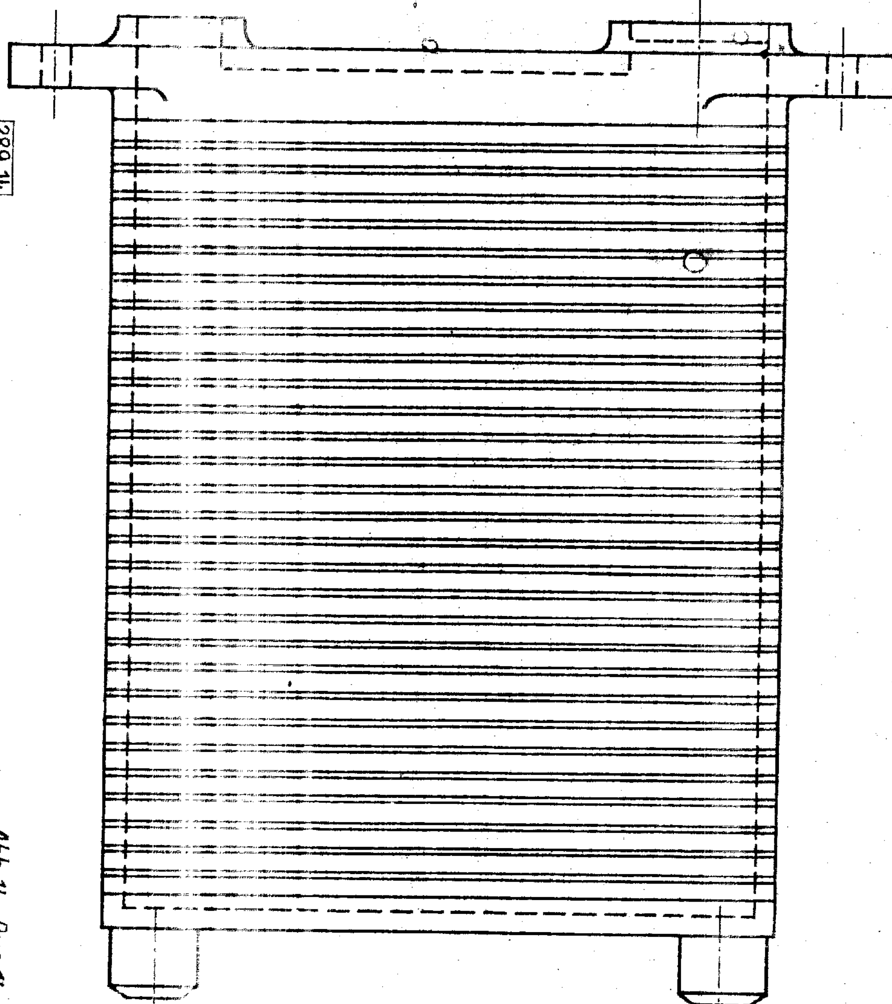


289.19 Abb. 19 Рис. 19



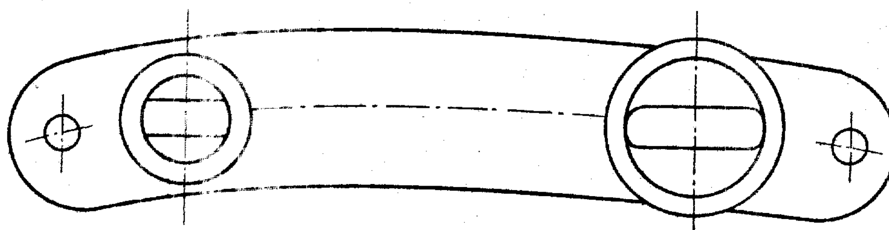
289.16

Abb. 16 Рис.16



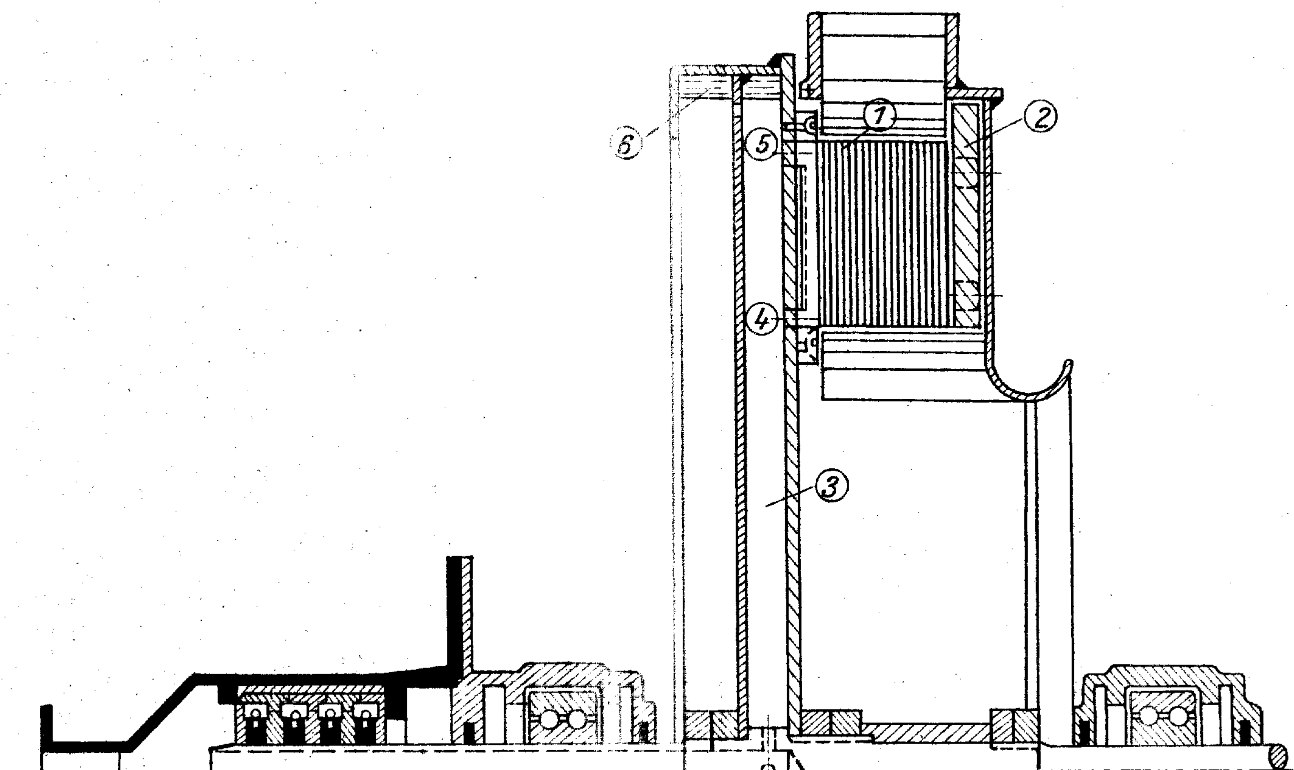
289.14

Abb. 14 Рис. 14



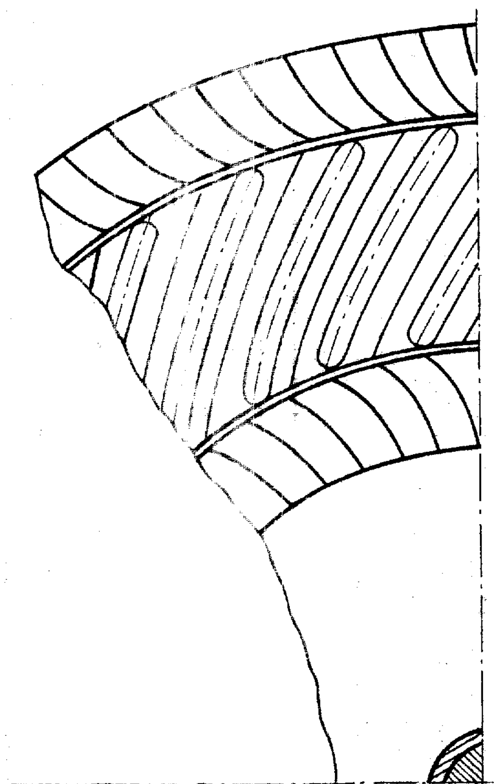
289.15

Abb 15 Рис.15



289.12

Abb. 12 Рис. 12



289.13

Abb. 13 Рис. 13

4

3

1

2

Abb.10 Рис.10

289.10

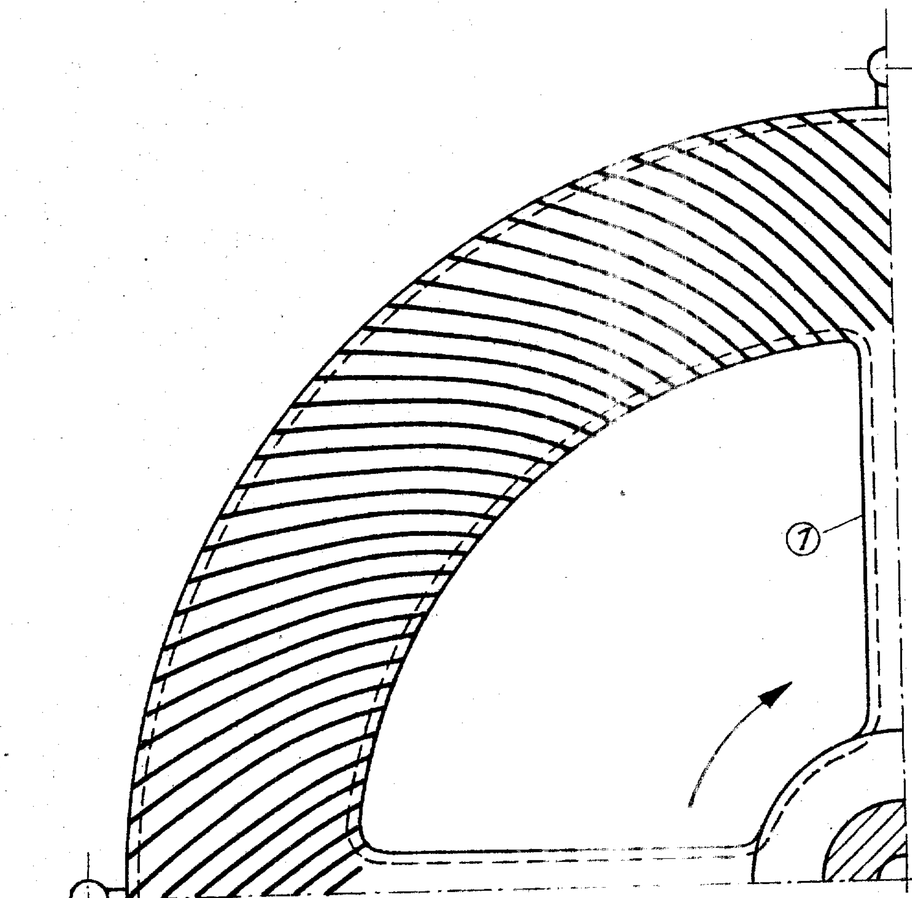


Abb.11 Рис.11

289.11

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

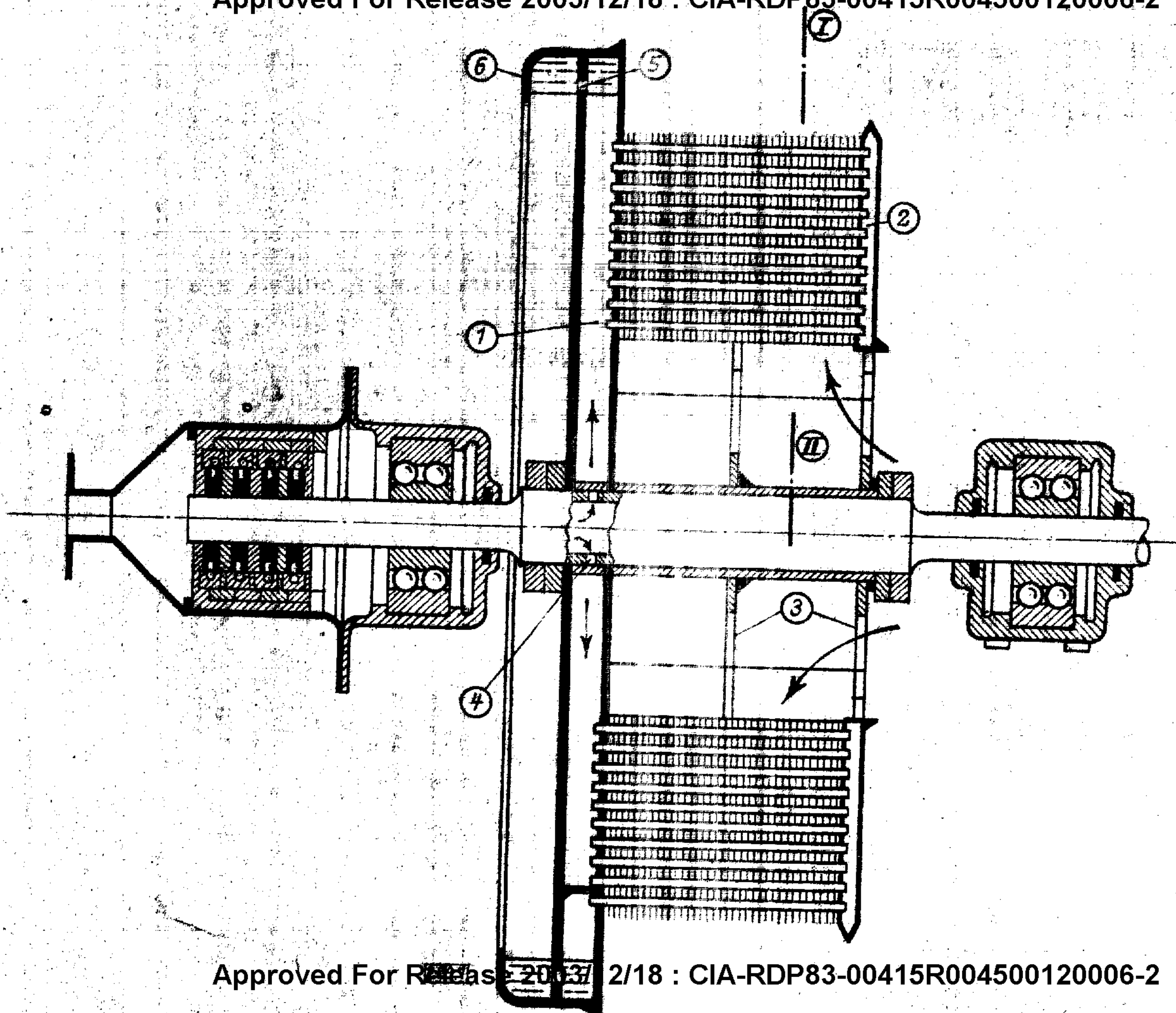
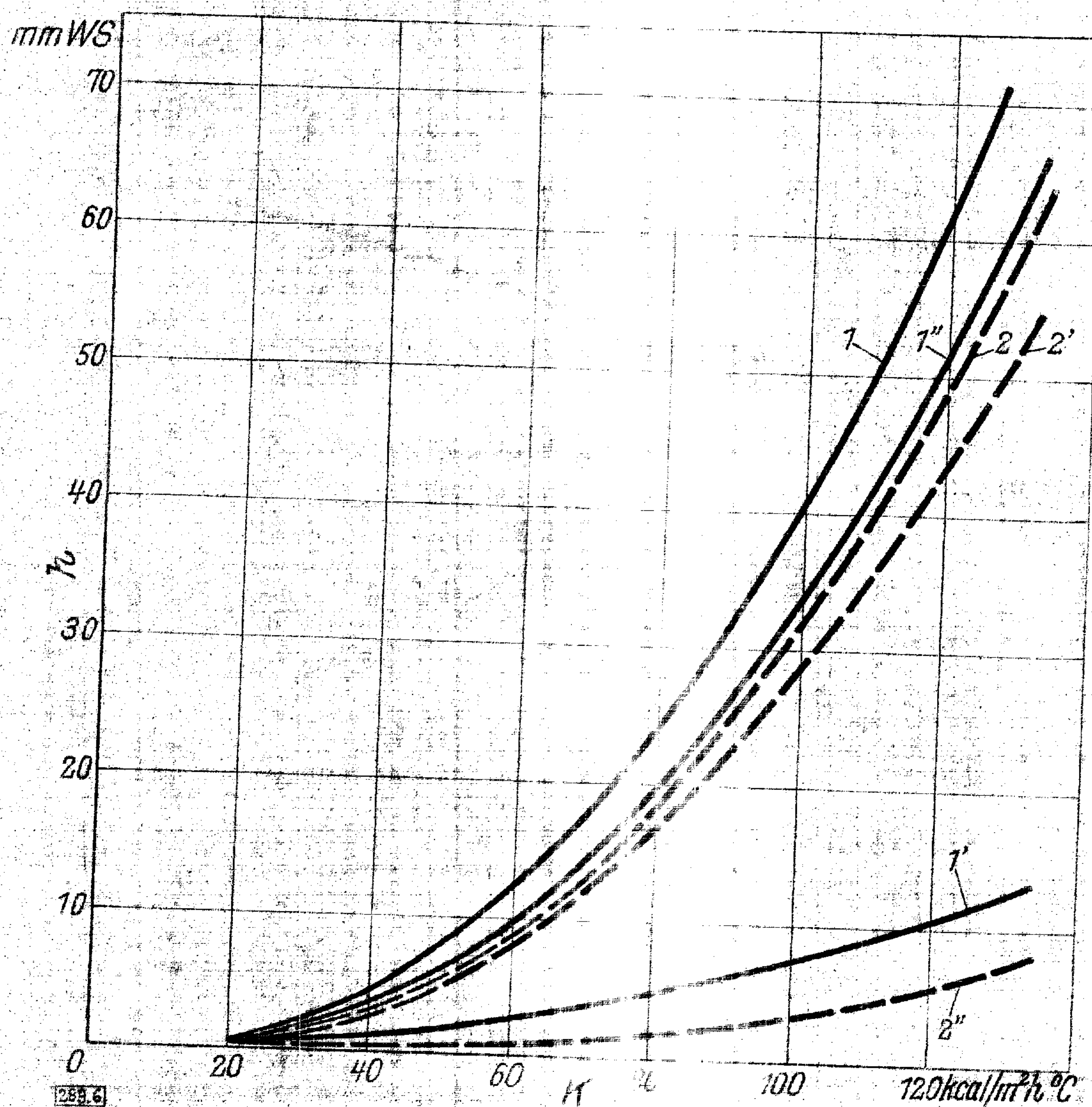


Abb.7
Рис.7



mmWS
70
60
50
40
30
20
10
0
h
20
40
60
100
120kcal/m²h °C
K
1
1"
2
2'
1'
2"
289.6

Abb. 6 Рис. 6

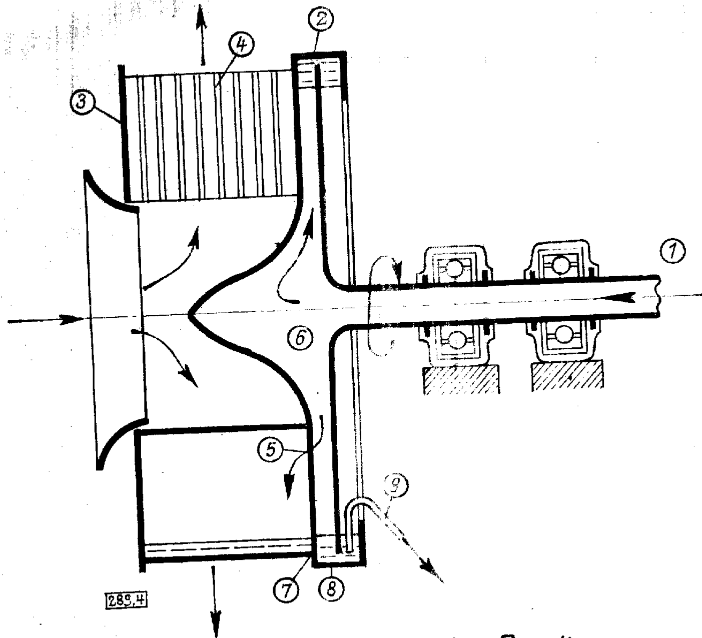


Abb.4 Рис.4

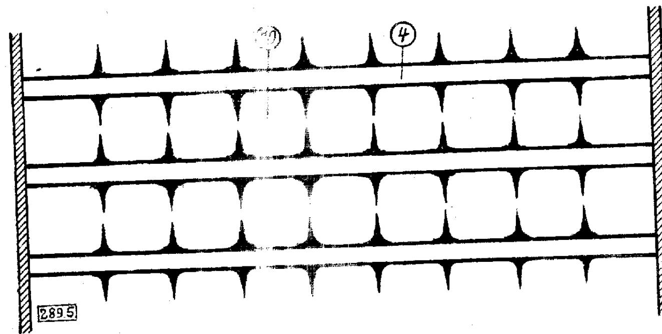


Abb.5 Рис.5

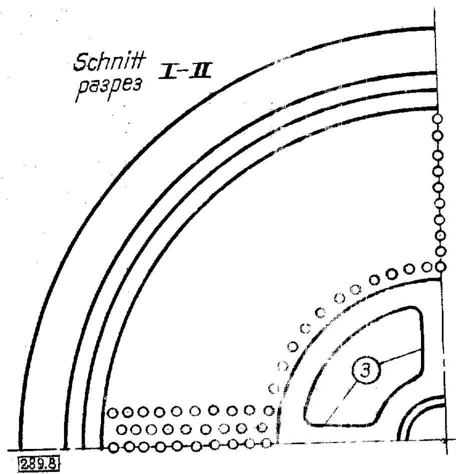


Abb.8 Рис.8

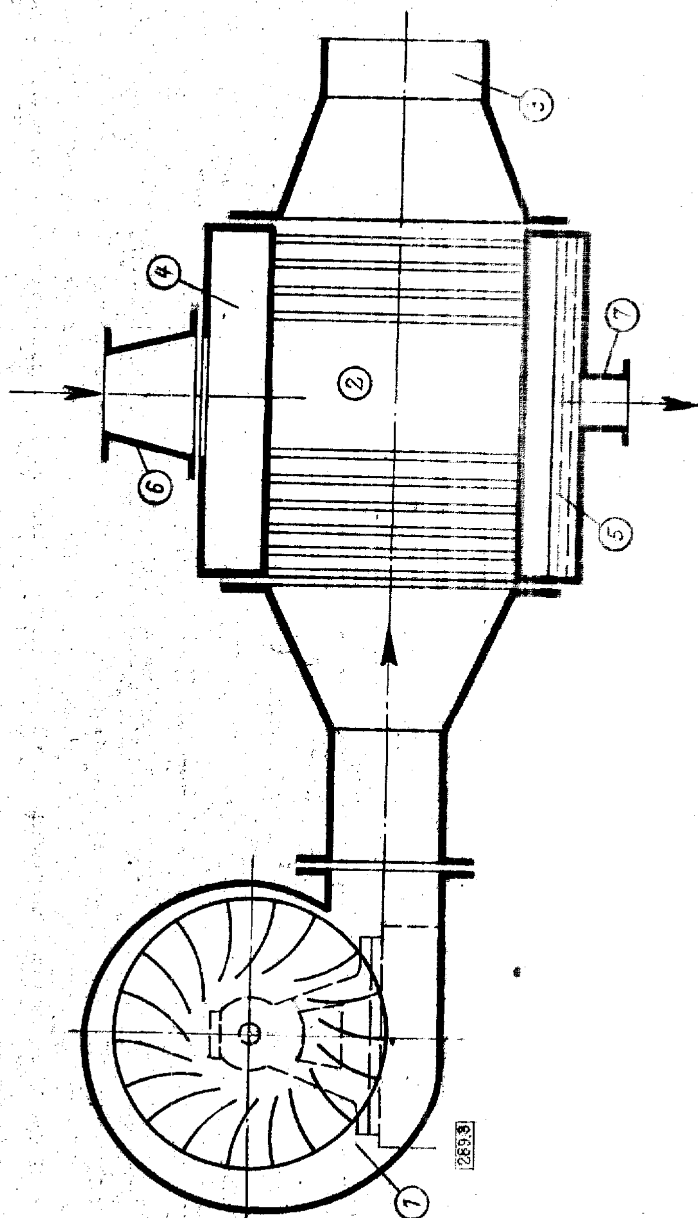


Abb.3 Рис.3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

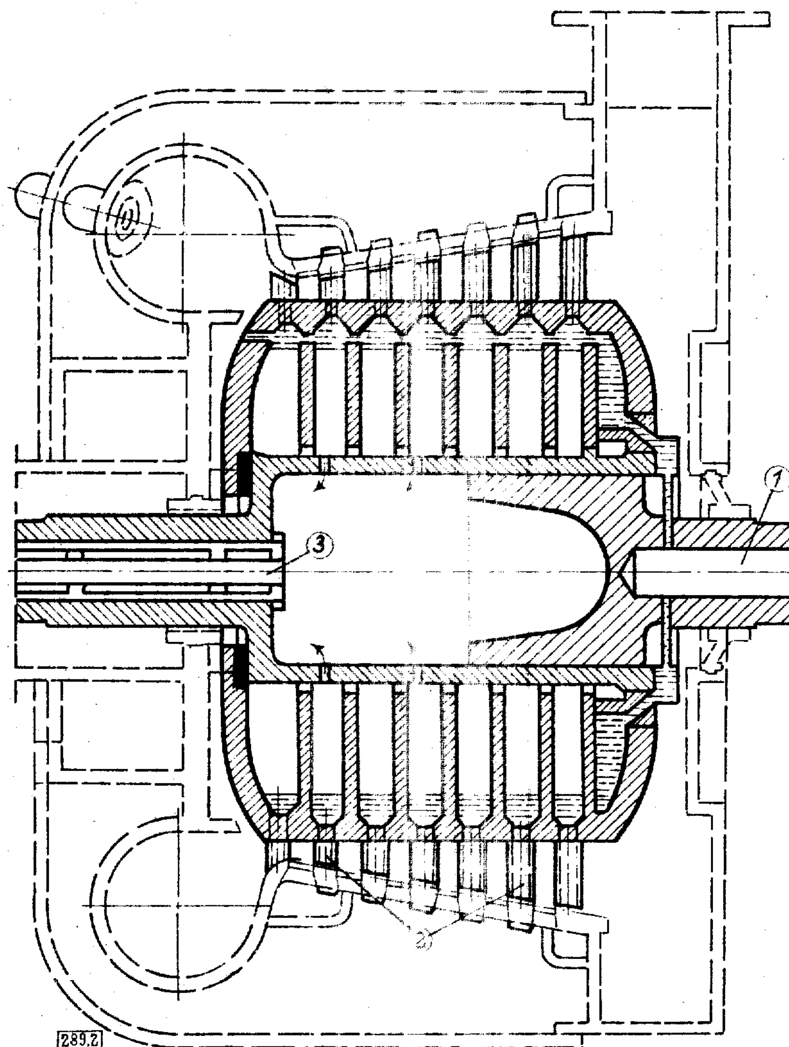


Abb.2 Рис. 2

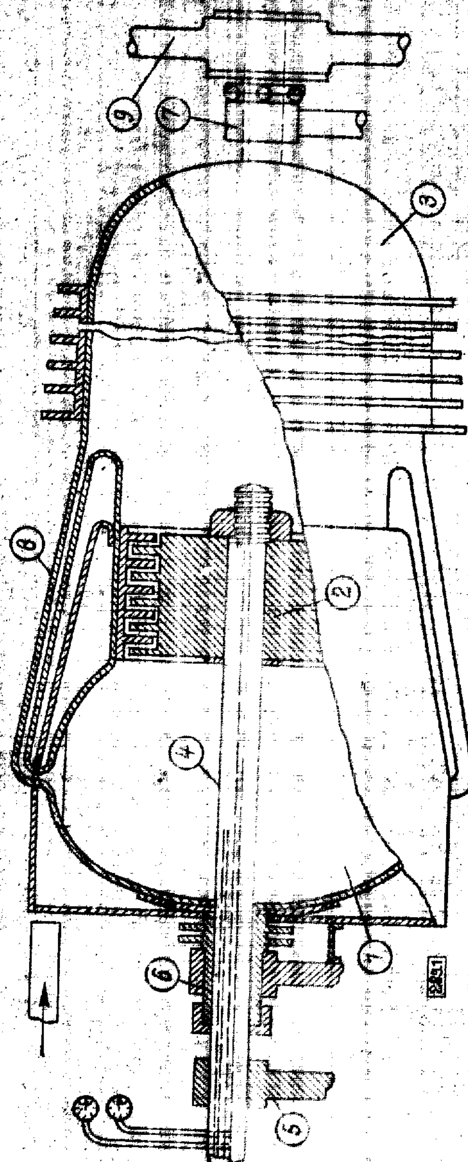


Abb.1 Рис.1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

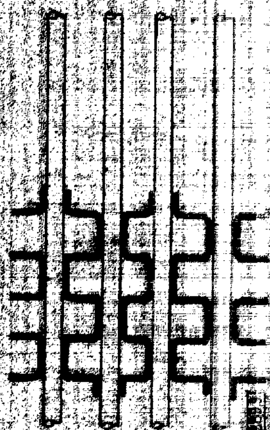


Abb.9 Рис.9

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

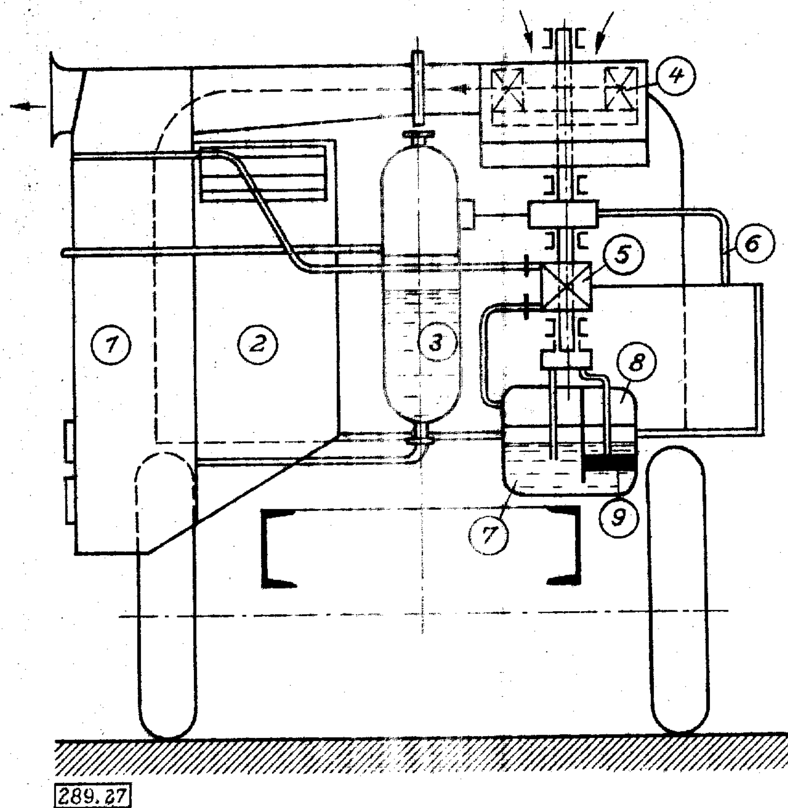


Abb.27 Рис. 27

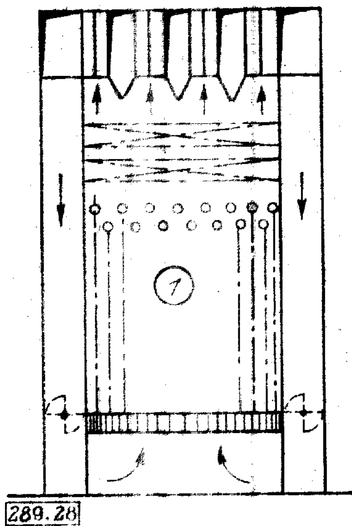


Abb.28 Рис.28

Seite

A. Allgemeiner Teil.

I. Der Begriff der Oberfläche

1. Begrenzung des Themas

In diesem Bericht wird unter "Oberfläche" die Grenzfläche der Werkstücke verstanden, wie sie sich bei der Herstellung und der Verarbeitung des Konstruktionsmetalles ergibt, ohne Aufbringung eines anderen Werkstoffes und ohne absichtliche chemische oder physikalische Veränderung. Die Verzinkung, Verzinnung, Verchromung, Vernickelung, Phosphatierung und dergl., die Härtung, Vergütung, Einsatzhärtung oder Kaltstreckung, also alle künstlichen Oberflächenschichten, werden nicht behandelt.

2. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Oberfläche

a. Die Richtungen der Atomkräfte

Die Atome der (festen und flüssigen) Körper binden sich gegenseitig durch Anziehungs- und Abstossungskräfte auf einen bestimmten mit der Temperatur veränderlichen Abstand. Die Kräfte der Nachbaratome wirken aus allen Richtungen auf jedes Atom. Die Atome der äussersten Atomschichten an der Oberfläche werden jedoch nur von den im Innern der Körper liegenden Atomen angezogen. Den sie nach innen ziehenden Kräften halten keine nach aussen wirkenden Atomkräfte das Gleichgewicht, daher stehen die Atome der Oberflächenschicht unter einem nach innen gerichteten Zug.

b. Die Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Alle diese nach innen gerichteten Kräfte, mit Ausnahme der zur Oberflächen-Potentialebene winkelrechten, haben Komponenten in den Richtungen der Oberfläche. In der Oberfläche wirken also Kräfte wie in einer gespannten Membran. Man bezeichnet deren Gesamtheit als

Oberflächenspannung. Es besteht jedoch ein Unterschied gegenüber der Wirkung einer Membran. Je mehr eine Membran gedehnt wird, desto grösser wird ihre Spannung. Eine Flüssigkeitsoberfläche dagegen, und ebenso die Oberfläche der festen Körper, hat konstante Spannung, einerlei, ob sie vergrössert oder verkleinert wird. Den Betrag der Spannung, bezogen auf die Längeneinheit eines Oberflächenschnittes, bezeichnet man mit γ. Der Wert γ ist, wenn die Flüssigkeit oder der feste Körper an ihre Dampfphase grenzen, eine vom Werkstoff abhängige (spezifische) Konstante. Um die Oberfläche, entgegen der Wirkung der Oberflächenspannung, zu vergrössern, muss Arbeit geleistet werden. Wird sie verkleinert, so wird Arbeit frei. Die Arbeit, die erforderlich ist, um eine zusätzliche Flächeneinheit der Oberfläche zu erzeugen, ist numerisch gleich γ. Sie wird als Oberflächenenergie bezeichnet.

c. Der Zustand der Oberflächenatome.

Infolge dieser besonderen Energieverhältnisse an der Oberfläche müssen alle physikalisch-chemischen Vorgänge an der Oberfläche anders verlaufen als im Inneren eines Metalles. Man kann dies auch anschaulich beschreiben. Da das geordnete Atomgitter nur unter der Einwirkung der nach allen Richtungen symetrisch verteilten Kräfte entstehen kann, befinden sich die Atome an der Oberfläche in verzerrter Anordnung. Der Zustand der Oberflächenatome nähert sich demnach der Amorphie. Infolgedessen ist ihr chemisches und physikalisches Verhalten anders als im Inneren des Metalles. Sie sind chemisch leichter angreifbar. In physikalischer Hinsicht zeigen sie ein anderes mechanisches Verhalten als die ~~Binnen~~-Atome im Inneren. Da nämlich die Oberflächenatome eine verzerrte Anordnung haben, können sie bei Beanspruchung durch äussere Kräfte keine Gleitschichten bilden, sondern jedes Atom muss der Spannung einzeln Widerstand leisten. Dabei wird bei einigen dieser Atome die Anordnung ohnehin schon so verzerrt sein,

dass sie an der Grenze der Kohäsion liegt. Bei solchen Atomen kann schon eine geringe äussere Kraft die Trennung des Atomzusammenhanges bewirken.

d. <u>Die Dicke der Oberflächenschicht im physikalisch-chemischen Sinne.</u>

Die geschilderte physikalisch-chemische Besonderheit ist an der Oberfläche nur so weit vorhanden, wie die Atomanordnung verzerrt ist. Das ist nur bei einer verhältnismässig geringen Anzahl von Atomschichten der Fall. Weiter nach innen zu tritt alsbald das regelmässige oder nur gering verzerrte Gitter auf. Dies bedeutet eine Dicke der Oberflächenschicht in der Grössenordnung von schätzungsweise etwa 20 Å (1 Å = 10^{-8} cm). Die Dicke der Oberfläche im physikalisch-chemischen Sinne ist also sehr gering.

3. <u>Der technische Begriff der Oberfläche und die technologische Bedeutung der physikalisch-chemischen Oberflächeneigenschaften.</u>

In der Technik ~~[illegible]~~ definiert man die Oberfläche auf Grund ihrer technologischen Verschiedenheit vom Inneren der Körper. Diese Verschiedenheit betrifft eine Oberflächenschicht mit einer Grössenordnung von etwa 1 mm, wie die folgenden Beispiele zeigen. Auf unbearbeitetem gewalzten oder geschmiedeten Stahl ist die entkohlte weiche Oberflächenschicht etwa 0,1 bis 0,2 mm tief. Die Gusshaut von Grauguss ist etwa 0,2 bis 0,5 mm dick. Die Härtetiefe bei einsatzgehärtetem Stahl beträgt etwa 0,2 bis 2 mm. Die Kalthärtung durch spanabhebende Bearbeitung kann etwa 0,2 mm bis 2 mm tief eindringen. Man versteht also technisch unter dem Begriff Oberfläche eine Schicht von etwa 0,1 bis 2 mm Dicke. Die Begriffe der physikalisch-chemischen Oberfläche und der technischen Oberfläche sind daher völlig verschieden, weil die darunter vorgestellten Abmessungen um viele Grössenordnungen voneinander abweichen. Man könnte meinen, dass die physikalsch-chemische

Oberfläche mit ihren Besonderheiten den Techniker nicht interessiere. Diese Auffassung mag vor einigen Jahrzehnten berechtigt gewesen sein, heute wäre sie bei den erhöhten Anforderungen, die jetzt an den Werkstoff gestellt werden, ein verhängnisvoller Irrtum. Es hat sich gezeigt, dass auch die Vorgänge in der physikalisch-chemischen Oberfläche für die Technik Bedeutung haben. Dies möge an drei Beispielen gezeigt werden.

a. Die Reiboxydation nach Fink

In den Jahren 1929/3[illegible] sind bemerkenswerte Untersuchungen von M. Fink [1] und von M. Fink [illegible] und U. Hofmann [2,3,4] über die sogenannte Reiboxydation veröffentlicht worden. Die Reiboxydation als Oberflächenvorgang wird im Motorenbetrieb an manchen Konstruktionsteilen eintreten. Die Finkschen Feststellungen haben aber bisher nicht die Beachtung gefunden, die ihnen offenbar zukommt.

Fink untersuchte den Vorgang der Reibbeanspruchung. Er liess Stahlrollen bei normalem Anpressdruck und normaler Umlaufzahl trocken mit einem Schlupf von ca. 1% aufeinander laufen und untersuchte den dabei entstehenden feinpulverigen, dunklen Abrieb. Die chemische und röntgenographische Analyse ergab, dass der Abrieb zum grossen Teil aus Eisenoxyden bestand. Der Versuch wurde dann unter Ausschluss der atmosphärischen Luft wiederholt, indem die Rollen in einer Gaskammer unter Wasserstoff oder Stickstoff aufeinander liefen. Jetzt war der Abrieb wesentlich geringer und bestand aus Flittern metallischen Eisens. Entsprechende Versuche wurden mit Rollen aus Elektrolytkupfer und aus Nickel ausgeführt. Auch diese Metalle bildeten bei Reibung in Luft Oxyde, während der Abrieb bei Ausschluss der Luft metallisch war. Eisen, Kupfer und Nickel oxydieren bekanntlich in trockener Luft erst bei Erhitzung auf einige 100°. Fink schaltete jede wässrige Feuchtigkeit und jede Erhitzung aus, indem er die Reibversuche auch in flüssiger Luft anstellte. Auch dann bildeten sich

die Metalloxyde.

Diese Beobachtungen führten zu einer neuen weittragenden Theorie. Nach der früheren Auffassung hängt die Geschwindigkeit der chemischen Reaktionen im wesentlichen von der Temperatur ab. Fink stellte die Theorie auf, dass auch die mechanische Spannung fester Körper ihre chemische Reaktionsfähigkeit beeinflusse. Die Reibung an der Oberfläche der Körper, also die dynamische Verzerrung der Atomanordnung an der Oberfläche, erhöhe ebenfalls die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion. Diese Theorie der Reiboxydation ist in den angeführten Veröffentlichungen ausführlich erörtert und begründet worden und hat bisher keine Widerlegung gefunden. Sie wurde durch Versuche von H.J. Wiester [5] bestätigt, der feststellte, dass sich beim Polieren von Stahl in der äussersten Oberfläche Nitrid durch eine chemische Reaktion des Eisens mit dem Luftstickstoff bildet.

Der Vorgang der Reiboxydation umfasst aber mehr, als der Name besagt. Zufolge der Fink'schen Theorie verursacht jede dynamische Verzerrung der Atomanordnung eine Erhöhung der chemischen Aktivität. Solche Verzerrung der Atomlage kann auch ohne Reibung geschehen. Wenn ein Stab auf Wechselbiegung beansprucht wird, z.B. in der Schenk'schen Dauerprüfmaschine, so wird an einzelnen ungünstig gelegenen oder vorgespannten Oberflächenatomen eine dynamische Zerrung vor sich gehen, vielleicht sogar bei allen Atomen, deren Lage durch Oberflächenspannung schon verzerrt ist. Dann muss eine Oxydation unter Wirkung der Atmosphäre eintreten, auch ohne dass diese Stellen gerieben werden. Man kann also ganz allgemein bei allen unter beträchtlicher Spannung betriebenen Rotorteilen die "Reiboxydation" erwarten. Fink und Hofmann zeigten, dass die Reiboxydation auch an ölgeschmierten Zahnrädern auftritt. Im Öl ist immer Luftsauerstoff gelöst. Die Bedingungen für die Oxydbildung an den geölten Reibstellen sind somit gegeben. Der dem Öl mitunter zugesetzte Graphit bildet eine dicht anhaftende Schicht auf dem Stahl und mag dadurch

die Oxydation behindern. Nach Fink und Hofmann wirkt die Reiboxydation auch bei der Bildung von Dauerbrüchen mit; infolge der Reibung auf der Spaltfläche sind dort die Bedingungen für die Oxydation gegeben. Die englischen Forscher B.P. Haigh und B. Jones[6] hatten bereits gezeigt, dass dem Sauerstoff bei der Dauerprüfung von Blei ein wesentlicher Einfluss zukommt.

Die Fink'schen Feststellungen haben bisher in der Praxis nicht zu entsprechenden Konstruktionsänderungen oder Vorbeugungsmassnahmen geführt. Vielleicht gibt es einen gangbaren Weg, die Reiboxydation zu hindern und dadurch den Verschleiss zu verringern und die Haltbarkeit zu erhöhen.

b. Die Dauerhaltbarkeit von Metallen nach Siebel und Stähli

Dass die Zerstörung bei Dauerbeanspruchung von der äussersten Oberfläche ausgeht, haben neuerdings Siebel und Stähli[7] in einer für die Kenntnis der Wechselbeanspruchung grundlegenden Untersuchung nachgewiesen. Sie prüften gekerbte Rundstähle aus Stahl mit der Schenk'schen Dauerprüfmaschine und ermittelten die Wöhler-Kurven und die Schadenslinien. Zur Feststellung der Schädigung wandten sie dabei die Zugkerbschlagprobe an. Sie bestätigten die schon von anderen Forschern mitgeteilten Beobachtungen, dass bei geringer Lastspielzahl zunächst eine Verbesserung, eine "Hochtrainierung" des Werkstoffes vor sich geht, und dass die Schadenslinie bei etwa 60 bis 80 % der Gesamtlastspielzahl nach der Wöhler-Kurve liegt. Sie ist gewissermassen ein in Richtung auf kleinere Abszissenwerte verschobenes Abbild der Wöhler-Kurve. Der grundlegende neue Versuch, den Siebel und Stähli anstellten, bestand darin, dass sie die äusserste Oberfläche der Versuchsstäbe nach Erreichung der Schadensliste mit der Dauerprüfmaschine vor dem Zuschlagversuch durch Abdrehen von Bruchteilen eines Millimeters entfernten. Jetzt hatte die Probe die volle

Zuschlagfestigkeit eines hochtrainierten Stabes. Eine Schädigung war also nicht feststellbar.

Siebel und Stählli entfernten nun an Probestäben nach Erreichung der Schädigungslinie die Oberfläche und setzten dann die Dauerprüfung fort. Nun wurde die Wöhler-Kurve beträchtlich überschritten. Die "Dauerhaltbarkeit" des Stahles war also [illegible] höher als die "Dauerfestigkeit" nach der Wöhler-Kurve. Wenn die Oberfläche eines Stabes auf diese Weise mehrmals während eines Gesamtversuches abgearbeitet wurde, so konnten Lastspielzahlen erreicht werden, die um [illegible] höher waren als diejenigen der Wöhler-Kurve. Durch diese Versuche ist nachgewiesen worden, dass die Schädigung der Werkstoffe bei Wechselbeanspruchung [illegible] nur an der äussersten Oberfläche auftritt und sich von hier aus durch Riss- und Dauerbruchbildung [illegible]. Der Stahl selbst (seine ganze Masse mit Ausnahme der äussersten Oberfläche) wird bei der Langzeitbeanspruchung von den praktisch anzuwendenden Spannungen nicht zermürbt, sondern sogar etwas verfestigt. Siebel und Stählli haben dabei untersucht, um wieviel man die Oberfläche zur Beseitigung der Schädigung abarbeiten muss. Dieses Maß zeigte sich als abhängig von der Lastspielzahl nach der Wöhler-Kurve. Bei etwa 20 % der [illegible]-Wöhler-Zahl genügt ein Abarbeiten der Oberfläche um nur 0,01 mm! Man könnte dies praktisch fast beliebig oft ausführen, ohne den Querschnitt eines Konstruktionsteiles merklich zu schwächen. Ein Dauerbruch würde durch solches Verfahren vermieden werden können, selbst wenn die Beanspruchung von Stahl bei Dauerbiegung bei etwa 60 % der Streckgrenze läge.

c. Die amorphen Oberflächenschichten nach Glocker.

Bemerkenswerte [illegible] über die Natur polierter und [illegible] Oberflächen hat R. Glocker [8] mitgeteilt. Er polierte [illegible] auf einer feingeschliffenen Glasplatte von Hand [illegible] Polierpulver [illegible] den eigenen Abrieb [illegible] untersuchte dann die Oberfläche mit Elektronenbeugungsaufnahmen. Das Beugungsbild war ein ausgesprochenes [illegible]diagramm. Ein ebenfalls

amorphes Streubild entstand, als er eine kristalline Folie abätzte, kurzzeitig über einer Flamme erhitzte und abschreckte. Nach diesen Beobachtungen gewinnt die alte Vorstellung von Beilby stark an Wahrscheinlichkeit, dass beim Polieren durch rasche Abkühlung kleinster kurzzeitig aufgeschmolzener Bereiche eine amorphe Oberflächenschicht entsteht. Glocker untersuchte dann die Oberflächen von Lagerschalen aus Nickel, Zinn, Weissmetall und Rosemetall. Auch hier konnten nach der Beanspruchung in ölgeschmierten Lagern amorphe Oberflächenschichten nachgewiesen werden. Diese Beobachtungen mit ihrer Deutung zeigen, wie grundverschieden die Betrachtungsweise bei der physikalisch-chemischen Oberfläche von der Beurteilung einer technischen Oberfläche ist. Wenn eine technische Oberfläche, z.B. aus Nickel mit einer Schichtdicke in der Grössenordnung 1 mm, aufschmölze, so würde die ganze Lagerschale stark erwärmt werden, und man würde mit blossem Auge eine Feuererscheinung wahrnehmen. Die physikalisch-chemische Oberfläche im Lager ist aber nur einige Atomschichten dick. Sie kann sehr kurzzeitig in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde unter der Wirkung der Reibungswärme aufschmelzen und infolge der Wärmeableitung ins Lager sofort wieder erstarren, ohne dass eine Lichterscheinung sichtbar wird, und ohne dass das Lager fühlbar warm wird. Die Abschreckung der entstehenden wenige Atomschichten tiefen Schmelzschicht ist denkbar schroff, da sie das darunter liegende kalte Metall benetzt und die abzuführende Wärmemenge sehr klein ist. Es ist dies der einzige bisher bekannte Fall, dass Metalle bei sehr schroffer Abschreckung nicht kristallinisch, sondern amorph erstarren. Die sehr dünne, fast nur zweidimensionale Schicht kann trotz ihrer kleinen Abmessungen technische Bedeutung haben. Sie muss sich hinsichtlich Korrosion und bei der Bindung des Epilamens, der aus absorbierten fremden Atomen bestehenden sog. äusseren Grenzschicht (siehe auch den folgenden Absatz), anders verhalten als eine kristallisierte Oberfläche desselben Metalls.

4. Die Adsorption an der Oberfläche.

Die Reibvorgänge und auch die Fink'sche Reiboxydation können erst richtig verstanden werden, wenn man eine besondere Wirkung der physikalisch-chemischen Oberfläche in Betracht zieht, nämlich die "Adsorption". Die Anziehungskräfte der Oberflächenatome sind, wie im Abschnitt "Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Oberfläche" beschrieben, nur seitlich und nach innen an Nachbaratome gebunden, nach aussen sind sie frei. Nach aussen wirkt also ein physikalisch-chemisches Kraftfeld im Atombereich der Oberfläche, d.h. in einer Entfernung von einigen Å - Einheiten. Sobald irgendwelche Gas- oder Flüssigkeits-Moleküle, in denen freie Energien geweckt werden können, in den Bereich dieses Kraftfeldes gelangen, werden sie gebunden. Dies geschieht praktisch immer, da stets die Atmosphäre oder Flüssigkeiten eine Oberfläche berühren. Man kennt nur zwei Ausnahmefälle, wo dies nicht der Fall ist:
1. Im Hochvakuum, 2. in geschlossenen Hohlräumen, welche im Inneren der Metalle durch mechanische Zerreissung, z.B. beim Ziehen oder Walzen entstehen. Die Bindung von Fremdatomen an eine freie Oberfläche bezeichnet man als Adsorption. Die adsorbierte Schicht besteht nur aus einigen wenigen Atomschichten. Man bezeichnet sie als Epilamen. Sie wird auch Grenzschicht genannt, und zwar "äussere Grenzschicht", während die äussersten Atomschichten der Metalloberfläche die "innere Grenzschicht" bilden. Die Atome der äusseren und inneren Grenzschicht sind meist chemisch aneinander gebunden. Auf Eisen, Aluminium, Magnesium u.a. entstehen an der Luft Oxydschichten als Epilamen. Wenn solche Oxydschicht dicht ist, gewährt sie einen guten Korrosionsschutz (Abschnitt "Die Passivität des Eisens", Seite 34). Von besonderer technischer Bedeutung ist ferner das Epilamen, das die fettigen Schmiermittel auf den Lagermetallen bilden (vergl. später Abschnitt "Die Lagerreibung" S. 24 u.f). Es haftet so fest und ist so innig mit der inneren Granzschicht verbunden,

dass es durch kein Lösungsmittel abgewaschen werden kann. Will man es entfernen, so bleibt nur die Möglichkeit, es zugleich mit der inneren Grenzschicht mechanisch abzukratzen. Von dem Epilamen zu unterscheiden sind die als "Patina" bezeichneten Oberflächenschichten, wie sie sich z.B. auf Kupfer und Bronzen bilden. Die Dicke des Epilamens bemisst sich nach Å-Einheiten, es ist auch mikroskopisch nicht sichtbar. Eine Patina dagegen bildet eine Schicht von ca. 0,1 bis 1 mm Dicke. Sie ist eine festhaftende, dichte die Korrosion hemmende Kruste, welche durch chemische Reaktion des Metalles mit Luft und Wasser entsteht.

II. Die Metallkunde der Oberfläche

Die physikalisch-chemische Oberfläche ist nur ein vom menschlichen Geiste verallgemeinernd geschaffener Begriff. Auch seine Elemente sind Begriffe: Die Atome stellt man sich als Kraftpunkte vor, "Kraft" ist ein Kausalbegriff, die Kraft- und Energiewirkungen werden nach steoremetrischen und algebraischen Gedankenregeln beurteilt. Diese Denkweise ist ähnlich unwirklich wie z.B. bei dem Begriff "Kristall". Durch die stereometrische Vorstellung der regelmässigen körperlichen Symmetrie wird eine Anschaulichkeit vorgetäuscht. Doch jede Wirklichkeit ist anders als das begriffliche Ideal. Es gibt keinen einzigen kristallisierten Körper, der sich nicht durch Schiefheiten, Fehlstellen, Ungleichmässigkeit, Unsymmetrie und Krümmungen von der ideelen Kristallvorstellung unterschiede. So ist auch jede gegenständliche Körperoberfläche verschieden von dem gedanklich aus Kraftpunkten und räumlichen Kraftrichtungen zusammengestellten physikalisch-chemischen Oberflächenbegriff. Man muss also, um den Begriff der Oberfläche richtig anwenden zu können, die Beschaffenheit der Oberfläche auf Grund der Lehren der Metallkunde erkannt haben.

1. Die Homogenität und Heterogenität

Metalle, deren sämtliche Kristalle die gleiche chemische

Zusammensetzung haben, bezeichnet man als "h o m o g e n" Sie sind aus Elementen aufgebaut (z.B. Elektrolyteisen, Weichblei, Reinzink u.a.) oder aus deren Mischkristallen (z.B. austenitischer Nickelstahl, α-Messing u.a.). Homogene metallische Werkstoffe, die nur aus einheitlichen chemischen Verbindungen bestehen, werden wegen ihrer Sprödigkeit nicht für Konstruktionsteile angewandt. Als h e t e r o g e n bezeichnet man Metalle, die ein Gemenge chemisch verschiedener Kristallarten sind. (Kohlenstoffstahl, die meisten Sonderstähle, Messing, Aluminium-Legierungen u.a.) Man fordert auch von den heterogenen Konstruktionsmetallen eine mechanische Gleichmässigkeit nach allen Richtungen, weil man nur dann ihre Festigkeit zuverlässig berechnen kann. Die heterogenen Bestandteile müssen also so gleichmässig verteilt und im Verhältnis zum beanspruchten Querschnitt so klein sein, dass die mechanischen Unterschiede sich ausgleichen (Quasiisotropie). Der Unterschied der Eigenschaften homogener und heterogener Metalle äussert sich immer in deren Oberfläche. Sie haben verschiedene Reib- und Korrosionseigenschaften.

a. Es gibt technisch kein homogenes Metall

Fast alle technisch angewandten Metalle enthalten Schlackeneinschlüsse oder andere heterogene Verunreinigungen. Die vollkommene Homogenität besteht nur als Begriff. In gegenständlicher Wirklichkeit gibt es kein ganz homogenes Metall. In allen aus Mischkristallen aufgebauten Metallen besteht fast immer Kristallseigerung: die Korngrenzen sind höher legiert als das Innere der Körner. Jedes, auch ein sogenanntes reines Metall, enthält Spuren von Verunreinigungen. Diese werden bei der Erstarrung auf die Korngrenzen gedrängt. Löst man ein Metall in einem Lösungsmittel, das nur die Metallatome angreift, so bleibt stets ein hauchfeines Maschwerk übrig mit Maschen von der Gestalt der Metallkörner. Die "Homogenität" der Oberfläche ist also nur als ein sehr selten vorkommender Grenzfall

anzusehen, praktisch sind alle Oberflächen der Konstruktionsmetalle mehr oder weniger heterogen. Hinsichtlich des Korrosionsangriffs muss man deshalb mit örtlicher Heterogenität rechnen, bezüglich der Reibeigenschaften jedoch darf man die geringen unbeabsichtigten Fremdeinschlüsse als unerheblich vernachlässigen.

b. Übersicht über die Gefügebestandteile der Oberfläche einiger im Motorenbau angewandter Metalle

Die Heterogenität ist bei einigen metallischen Werkstoffen eine Folge der Erzeugungsart dieser Werkstoffe. Das Kupfer enthält infolge der Oxydation beim raffinierenden Schmelzen stets Kupferoxydul. Reinkupfer ist deshalb immer eine Legierung aus Kupfer und Kupferoxydul. Aller Stahl enthält Zementit, weil die Erzeugung eines kohlenstofffreien Eisens viel zu teuer ist. Im Aluminium findet sich stets Silizium als Gefügebestandteil, da die Herstellung völlig reinen Aluminiums zu teuer sein würde und ein entsprechendes Herstellungsverfahren auch nur mit grossen Schwierigkeiten praktisch durchzuführen wäre. Heterogenität ist jedoch kein Fehler, sondern erwünscht und notwendig zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Wenn es nicht auf besondere Eigenschaften, z.B. Tiefziehfähigkeit, ankommt, so bewähren sich hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit diejenigen Metalle am besten, die aus einer zähen Grundmasse mit feinverteilten härteren Einlagerungen bestehen. Solchen Aufbau haben die Stähle, Bronzen und Leichtmetalle. Das Prinzip des Eisenbetons bzw. der benagelten Schuhsohle ist durchgängig angewandt. Die Schneide eines feingeschliffenen Stahlmessers wirkt als Säge; wenn man sie im Mikroskope betrachtet, sieht man, dass die regelmässig eingelagerten harten Karbide wie Sägespitzen in der Schneide hervortreten. Durch Walzen, Schmieden und Ziehen werden die harten Einlagerungen mechanisch zerkleinert und gleichmässig verteilt. Die Festigkeit und Härte der Werkstoffe werden fast um eine

Zehnerpotenz erhöht, wenn ihre harten Bestandteile durch Wärmebehandlung besonders fein verteilt sind (vergüten, aushärten). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Bestandteile einiger im Motorenbau angewandter Metalle. Man hat erst neuerdings nach Einführung des Mikrohärteprüfers [9] begonnen, die Härte der Bestandteile zu bestimmen.

2. Wirkung der Form und Anordnung der Gefügebestandteile

a. Die lamellare und körnige Form

Die Form und Anordnung der Einlagerungen haben grosse Wirkung auf die Gesamthärte- und Festigkeit des Werkstoffes. Wenn in einen Haufen Lehm eine Anzahl von Eisenblechen eingeschoben ist, so ist der Haufe versteift. Mischt man ihm aber dieselbe Eisenmenge in Form kleiner Kugeln bei, so wird seine Plastizität kaum gemindert. Entsprechend wird Stahl wesentlich härter und fester, wenn der Zementit in Form von Lamellen als Bestandteil des lamellaren (streifigen) Perlites eingelagert ist. Bei kugeliger Ausbildung des Zementites sind die Härte und die Festigkeit des Stahles um etwa 50% geringer. Damit harter Stahl wirtschaftlich und gleichmässig bearbeitbar wird, muss deshalb der Zementit in die kugelige Form übergeführt werden. Auch für die Härtung des Stahles soll der Zementit die Form kleiner gleichmässig verteilter Kügelchen haben. Entsprechendes gilt für alle harten Einlagerungen der Metalle. Liegt der Zementit als zusammenhängende Schicht auf den Korngrenzen, so ist der Stahl schlagempfindlich und nicht tiefziehbar. Für alle Metalle, insbesondere für Stahl und Aluminiumlegierungen, wird das Korrosionsverhalten dadurch beeinflusst, ob die heterogenen und deshalb elektrochemisch aktiven Bestandteile auf den Korngrenzen als Netz oder als Körner ausgeschieden sind.

b. Die Korngrösse

Besondere technische Bedeutung hat die Korngrösse der Grundmasse. Die Bruchfläche eines Metalles bei der

Zerreißprobe verläuft stets durch die Körner, nicht aber entlang den Korngrenzen. Die Korngrenzen sind also Orte höherer Zerreißfestigkeit, deshalb ist ein Metall desto fester, je mehr Korngrenzen es enthält, also je feinkörniger es ist. Anders verhalten sich die Metalle bei ruhender Dauerbelastung. Schon unterhalb der Spannung, bei der sich Gleitschichten im Korninneren bilden, beginnt unter dem Einfluss der Dauerlast ein Platzwechsel der Atome auf den Korngrenzen. Das Metall beginnt, der Spannung nachgebend, sich allmählich zu längen, zu "Kriechen". Bei ruhender Dauerlast ist also das Korngrenzengebiet mechanisch schwächer als das Korninnere. Deshalb sollen die auf Dauerlast beanspruchten Konstruktionsteile, und diese sind in der Mehrzahl, nicht zu feinkörnig sein. Jedoch verbietet sich ausgesprochene Grobkörnigkeit, weil dann die Schlagfestigkeit stark absinkt. Nun sind gerade die ausgehärteten Vanadium-Stähle mit der grössten Dauerfestigkeit am feinkörnigsten. In diesem Falle liegen die feinausgeschiedenen Karbide auf den Korngrenzen und hindern dort das "Kriechen" des α-Eisens.

c. <u>Die Textur</u>

In den verschiedenen Kristallrichtungen haben die einzelnen Kristalle verschiedene chemische Angreifbarkeit und verschiedene mechanische Eigenschaften. Auf dieser chemischen Differenzierung beruht die Sichtbarmachung des Gefügebildes durch Ätzung. Wie sehr die mechanischen Eigenschaften in den verschiedenen Kristallrichtungen voneinander abweichen können, lässt sich aus Beobachtungen am Graphit erkennen. Parallel zur hexagonalen Basisfläche gleiten die Graphitlamellen ausserordentlich leicht, sozusagen ohne Widerstand, aufeinander ab. Deshalb gehört Graphit zu den weichsten Körpern. Seine Oberflächen liegen nach dem Schleifen und Polieren im Grauguss selten in der Schliffebene. Er schilfert ab und liegt vertieft. Aber in der Kristallrichtung winkelrecht zur Basisfläche sind die Kohlenstoffatome

des Graphites ebenso aneinander gebunden wie im Diamant. In dieser Richtung bilden sich keine Gleitschichten. Wenn Graphit in sphärolitischer Gestalt so kristallisiert ist, dass überall die Basisflächen tangential zur Sphärolithoberfläche liegen, so erweist er sich bei der Härteprüfung als ebenso hart wie Diamant.

Bei völliger regelloser Orientierung der Kristalle (sogenannter "statistisch gleichmässiger" Orientierung) gleichen sich die mechanischen Unterschiede für ihre Gesamtheit aus. Eine Metalloberfläche mit statistisch gleichmässiger Orientierung der Kristalle zeigt z.B. überall dieselbe Feinellhärte. Bei der Beurteilung eines einzelnen Oberflächenkristalles muss jedoch seine Orientierung beachtet werden. Man kann sie meist schon an der äusseren Form der Kristalle erkennen. Sobald die Orientierung der Kristalle nicht regellos, sondern gleichartig ist, (sogenannte "Gefügeregelung" oder "Textur") sind die mechanischen Eigenschaften einer Oberfläche, je nach ihrer Richtung zu den Kristallen verschieden. Dies ist besonders für die Oberfläche der Gußstücke zu beachten, weil hier am häufigsten Texturen vorhanden sind.

An der Oberfläche von Walzstücken liegen meist alle Kristalle mit derselben Kristallachse in der Abkühlungsrichtung. Auch beim Walzen und Ziehen von Metallen verschieben sich die Kristalle zu gleichsinniger Orientierung. Diese "Walz- und Ziehtexturen" verursachen auch bei der Rekristallisation eine wiederum gemeinsame Orientierung ("Rekristallisationstextur"). Sogar durch die Bearbeitung kann nach den Untersuchungen von A.A. Shishakow und V.J. Kasatochkin [10] eine Textur entstehen. Diese beiden Forscher fertigten Elektronenbeugungsaufnahmen von einer Messingoberfläche, welche ohne bevorzugte Richtung geschliffen war, und fanden dann eine regellose Orientierung. Wurde jedoch die Oberfläche unter Benutzung definierter Richtungen geschliffen, so trat eine Regelung deutlich hervor. Im untersuchten Fall verlief die Orientierungsachse parallel der (110) - Richtung.

3. Die durch die Art der Erzeugung der Konstruktionsteile veranlassten Oberflächeneigenschaften

Die Texturen lassen sich durch röntgenographische Untersuchungen der Oberfläche, mitunter auch schon aus der metallographischen Beobachtung erkennen. Zu beachten ist aber, dass die Beschaffenheit, die die Metalle an der Oberfläche je nach der Art ihrer Erzeugung aufweisen, des öfteren vom Metallinneren abweicht.

a. Die Gußhaut

Die Oberfläche von Gußstücken erfährt beim Gießen und bei der Erstattung eine chemische Änderung unter Einwirkung der Luft und der Gußform. Das Grundmetall und einige Legierungsbestandteile werden oxydiert, andere Legierungsanteile werden vergast; ferner werden Gase und feste Partikelchen der Formauskleidung aufgenommen. Daher finden sich in einer Schicht von 0,1 bis ca. 1 mm Dicke Einlagerungen mannigfacher Oxyde je nach der Zusammensetzung der Schmelze, bei Eisenschmelzen: Eisenoxyduloxyd und Eisensilikate, bei Kupferlegierungen: Kupferoxydul, bei Aluminiumlegierungen: Aluminiumoxyd. Durch Vergasung verarmt z.B. Sonderstahl in der Oberfläche an Molybdän, während Messing und Rotguss an Zink verarmen. Aus der Gießform werden vornehmlich kleine Sandkörner, aber auch Graphitteilchen, Lehmpartikelchen und dergleichen aufgenommen, aus den Gasen der Gießform nimmt Grauguß Schwefel auf. Bei Grauguß kommt zu dieser chemischen Änderung noch eine konstitutionelle Änderung der Gußhaut hinzu.[n] Die Eisen-Kohlenstofflegierungen erstarren mitunter in der schnell abkühlenden Gußhaut nach dem metastabilen Zementitsystem, es tritt dort etwas Ledeburit auf, während das gesamte übrige Gußstück nach dem Graphitsystem grau erstarrt. Auch gewisse Aluminium-Mangan-Legierungen können in der Oberfläche metastabil erstarren, so dass dort ein anderes Manganaluminid entsteht als im Inneren der Gußstücke.

b. Die Randschichten in Gußstücken

Die Korngrösse der Metalle hängt vom Temperaturgefälle bei der Erstarrung ab. Schnelle Erstarrung bewirkt ein feines, langsame ein grobes Korn. Die Beziehung ist nicht linear, sondern die Grösse der Körner nimmt bei Verlangsamung der Erstarrung wie nach einer Exponententialkurve sehr beträchtlich zu. Unter der Oberfläche nach innen zu

20 % ansteigen, der Phosphorgehalt in Stählen mit durchschnittlich 0,01 % P auf 0,1 % und mehr. Bei der "normalen" Blockseigerung finden sich die Anreicherungen der Nebenbestandteile im Inneren des Stückes, so in Stahl und in Grauguss, bei der "umgekehrten" Blockseigerung werden die Legierungsbestandteile in der Rinde angereichert, so bei Aluminiumlegierungen und einigen Kupferlegierungen. Die Seigerung wird im speziellen Teil des Berichtes unter "Stahl", Seite 37/39 eingehend beschrieben. Hier genüge der Hinweis, dass die Oberfläche der Konstruktionsteile infolge der Seigerungen sowohl in Guß- als auch in Schmiedestücken und gewalzten Werkstücken anders legiert sein kann als das Innere.

d. <u>Die Entkohlung der Stahloberfläche</u>

Beim Schmieden, Warmwalzen, Glühen und Härten von Stahl wird dessen Oberfläche durch die oxydierende Wirkung der Luft in einer Tiefe von etwa 0,1 bis 0,5 mm entkohlt. Diese Schicht wird von Konstruktionsteilen fast immer durch Bearbeitung entfernt (An sich würde sie die Festigkeit kaum beeinträchtigen; bei Dauerbeanspruchung in Zimmertemperatur würde sie infolge ihrer Weichheit sogar weniger als eine härtere Oberfläche zermürbt werden). Von praktischer Bedeutung ist die Oberflächenentkohlung bei Schneidwerkzeugen. Gerade die Schnittkante muss hart und ohne jede Spur einer weichen Haut sein. Man hat gelernt, durch Härten aus Salzbädern die Oberflächenentkohlung der Werkzeuge zu vermeiden und durch nitrierende Härtebäder gerade auf der Oberfläche eine besonders harte, feine Nitrierschicht zu erzeugen.

e. <u>Die Kalthärtung der Oberfläche durch Bearbeitung</u>

Die mechanische Kraft der spanabhebenden Werkzeuge ist in der Schnittfläche so gross, dass der bearbeitete Werkstoff dort abreisst. Er wird bei der Bearbeitung also plastisch verformt. Es ist klar, dass diese

entstehen geradezu Schichten mit plötzlich stark vergrößerter Kristallisation.

Auch die Orientierung der Kristalle ist in Gußstücken von aussen nach innen verschieden. Auf eine schmale gleichmässig orientierte Feinkornschicht der äussersten Rinde folgt nach innen zu meist eine breite Schicht von Stengelkristallen. In allen diesen liegt die gleiche Kristallachse ziemlich parallel mit der Abkühlungsrichtung (Einstrahlung, Transkristallisation, Gefügeregelung). Noch weiter innen, unterhalb der Stengelkristalle, befindet sich eine Grobkornmasse ohne Gefügeregelung. In grossen dickwandigen Gußstücken ist dergestalt der Gefügeaufbau von Zentimeter zu Zentimeter verschieden, in kleinen dünnwandigen von Millimeter zu Millimeter. Bei Bearbeitung der Gußstücke werden diese Schichten angeschnitten und erscheinen in der bearbeiteten Oberfläche. Wenn die Rinde der Gußstücke nicht parallel zur Gußoberfläche, sondern schräg zu ihr abgearbeitet wird, so enthält die bearbeitete Oberfläche Streifen mit verschiedenem Gefügeaufbau und entsprechend verschiedener Festigkeit, insbesondere verschiedener Schlagfestigkeit.

c. <u>Die Seigerung</u>

Die im Abschnitt "Es gibt technisch kein homogenes Metall" S. 12 erwähnte Kristallseigerung geschieht innerhalb der einzelnen Kristalle als eine Entmischung mikroskopischen Ausmasses. Daneben vollzieht sich in vielen Legierungen die "Block- oder Gußstückseigerung", welche eine Entmischung der Legierung über Strecken von Zentimetern und dezimetern bewirkt. Die Randschichten der Gußstücke erstarren mit anderen Konzentrationen als der Kern. Aus der homogenen Schmelze entstehen differente Legierungen, deren Gehalte bis zu 1000 % und mehr verschieden sein können, z.B. kann der Kupfergehalt in den Aluminiumlegierungen mit durchschnittlich 4 % Cu örtlich auf über

plastische Verformung nicht an der Bearbeitungsfläche halt macht, sondern auch in die Tiefe wirkt. Nach Versuchen von W. Ruttmann[6a] ist eine Schicht von etwa 2 mm Dicke unter der Oberfläche infolge der spanabhebenden Bearbeitung kaltverformt. Infolge der Kaltreckung übt diese Schicht eine Heyn'sche Spannung aus. Seine Versuche wurden mit einem Chrom-Nickel-Stahl mit 9% Ni und 18 % Cr (Stahl I in Abb. 1) und mit einem zweiten Chrom-Nickel-Stahl mit 4,36 % Ni und 1,11 % Cr (Stahl II in Abb. 1) ausgeführt. Die inneren Spannungen, vgl. Abb. 1, sind überraschend gross. Die Eigenschaften der beiden Stähle gehen aus der Tabelle in der Unterschrift zu Abb. 8 hervor.

Diese Spannungen summieren sich mit der physikalisch-chemischen Oberflächenspannung. Der Querschnitt eines bearbeiteten Werkstückes steht also unter einer Dauereigenspannung auf Druck, deren Grösse von der Fläche des Querschnittes abhängt. Diese Druckvorspannung hat die Grössenordnung von etwa 1 bis 2 kg/mm^2, darf also nicht vernachlässigt werden. Man hat sie bisher offenbar übersehen. Sie summiert sich z.B. bei Wechselbeanspruchung mit der äusseren Kraft, so dass unter Umständen die wirkliche Zugbeanspruchung um etwa 1 kg geringer, die Druckbeanspruchung aber um etwa 1 kg höher wird. Die Zerstörungen bei der Wechselbeanspruchung werden demnach auf der Druckseite zuerst einsetzen. Die Ordinatenwerte der Wöhler-Kurven müssen eine entsprechende Korrektur erfahren. Man darf von dieser Korrektur nur dann absehen, wenn ein Prüfstab nach der Bearbeitung zur Beseitigung der Heyn'schen Spannungen ausgeglüht worden ist. Bei röntgenographischer Untersuchung fanden H. Möller und A. Rott [13] etwas geringere Dicken der kaltverformten Schicht als Ruttmann. Nach ihren Beobachtungen betrug sie nach Schruppen und Bohren 0,5 bis 0,6 mm, nach

Schlichten, Schleifen und Läppen 0,2 bis 0,3 mm. Durch den Verschub wird die kalt verformte Schicht mehr verstärkt als durch die Schnittiefe [14]. Man kann den Reckzustand durch Gefügeuntersuchung erkennen und somit nachträglich feststellen, ob ein Werkstück nach der Bearbeitung geglüht worden ist oder nicht. Auch beim Kaltwalzen oder Hämmern wird die Oberfläche stärker gereckt als das Innere. Wenn solche Stücke geglüht werden, so rekristallisieren die gereckten Metalle. Die Korngrösse bei der Rekristallisation hängt vom Reckgrad ab. Sie ist deshalb dann an der Oberfläche anders als im Innern. Verhältnismässig häufig tritt bei Stahl der Fall ein, dass die Oberfläche gerade mit dem sogenannten kritischen Reckgrad (Reckung um etwa 7 bis 15 %) behaftet ist. Dann wird sie bei der Rekristallisation grobkörnig und spröde.

f. Fehlstellen in der Oberfläche

Erzeugungsfehler finden sich vorzugsweise an den Oberflächen der Werkstücke, z.B. Überwalzungen, Überlappungen beim Schmieden, Randblasen in Gußblöcken und in Formguss, Risse, Undichtheiten, unbeabsichtigte Einarbeitung kleiner Fremdkörper (Sand, Graphit, Späne anderer Metalle), Schlackenanhäufungen. Es ist daher üblich und in einigen Fällen erforderlich, dass die Oberflächenschicht der Gußblöcke vor der Weiterverarbeitung entfernt wird. Mitunter bessert man Fehlstellen an der Oberfläche, z.B. Löcher und Risse, durch Schweissen aus. Diese Schweißstellen liegen dann naturgemäss immer in der Oberfläche.

III. Anforderungen des Motorenbaues und -betriebes an die Oberfläche.

Die Konstruktionsberechnung der Maschinenteile gründet sich auf die Wissenschaft der Mechanik und Festigkeitslehre. Sie benutzt die Elastizitätstheorien und bestimmt die Trägheits- und Widerstandsmomente der beanspruchten

Querschnitte. In die betreffenden mathematischen Formeln geht die Oberfläche nicht ein, da sie zum tragenden Querschnitt senkrecht liegt. Weil die Oberfläche in der Konstruktionsberechnung nicht erscheint und auch sonst ihre Wirkungen auf das mechanische Verhalten der Werkstücke mathematisch nicht erfasst sind, hat man sich beinahe daran gewöhnt, von ihr abzusehen. Deshalb sei hier darauf hingewiesen, dass im Maschienenbetriebe alle beanspruchenden Kräfte die Oberfläche passieren müssen, ehe sie auf den tragenden Querschnitt einwirken.

Die Härte, Zähigkeit, Form und Glättung

Am sinnfälligsten ist die Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit für die Eigenschaft der Härte. Unter der Härte eines Werkstoffes versteht man seinen Widerstand gegen das Eindringen anderer Körper in seine Oberfläche. Die Oberfläche soll im Betriebe Druck- und Stoßkräfte von anderen Körpern aufnehmen, ohne ihre Form zu ändern. An den Oberflächen der Werkstücke muss die vorgeschriebene Härte vorhanden sein, und es ist gleichgültig, ob die Härte im Innern etwas geringer ist. Dementsprechend wird bei der Einsatzhärtung und der Verstickung von Stahl oder der Eloxierung von Aluminium nur an der Oberfläche eine hohe Härte erzeugt.

Nicht anders verhält es sich mit der Eigenschaft der Zähigkeit. Die Rissgefahr besteht fast nur in der Oberfläche, eine Kerbempfindlichkeit ist im Innern weniger gefährlich als aussen. Die moderne Formgebung der Maschinenelemente, die von Thum und seinen Schülern [15, 16, 17] eingeführt worden ist, sorgt dafür, dass der Kraftlinienfluss durch die Oberfläche möglichst gleichmässig ist und dass Kerbwirkungen an der Oberfläche vermieden werden.

Die mechanischen Spannungen werden dabei durch Kraftlinien dargestellt, ähnlich wie man den Begriff der magnetischen Kraftlinie bei Beschreibung der magneti-

schen Felder anwendet. Durch Feinmessung der Dehnung bei Beanspruchung der Maschinenelemente lässt sich die Verteilung der Spannung feststellen. Wenn man eine bestimmte Kraft pro Fläche als Kraftlinie definiert, kann man die Kraftlinien zeichnen. Abb. 2 zeigt die Formgebung eine Schraubenverbindung in alter Weise und nach der modernen Art. Man sieht, dass die Kraftlinien in der Darstellung 3 von Abb. 2 gleichmässiger und unter Vermeidung örtlicher Zusammendrängung verteilt sind. In diese Betrachtungsweise kann man auch die Oberfläche einführen und dabei ihre mechanische Beanspruchung mathematisch erfassen. Die Zahl der Kraftlinien, die durch die Flächeneinheit der Oberfläche laufen, gibt ein Mass für deren mechanische Beanspruchung, insbesondere kann man den Winkel, den der Kraftfluss mit der Oberfläche bildet, bestimmen. Die Kraftlinien sollen im Fall senkrecht in die Oberfläche eintreten. Sobald sie schräg auf die Oberfläche auftreffen entstehen Komponenten an der Oberfläche selbst, die sich mit der Oberflächenspannung summieren. Dann ist eine weitere Verzerrung der Oberflächenatome unvermeidlich, und bei Dauerbeanspruchung werden Risse entstehen. Besondere Bedeutung hat die Glättung der Oberfläche. Die modernen Bearbeitungsverfahren durch Feindrehen, Schleifen, Schwabbeln, Läppen, Feinpolieren u.s. sind hoch entwickelt und wissenschaftlich untersucht [18, 19] worden. Bei mikroskopischer Beobachtung erkennt man, dass jede bearbeitete, auch eine feinpolierte Metalloberfläche, sehr uneben ist. Man hat mannigfache Verfahren entwickelt, um die Form und Glättung der Oberfläche festzustellen und zu bewerten. Die apparativen Hilfsmittel, die Berechnungsverfahren sowie die eingeführten Begriffe sind so vielseitig geworden, dass sich die "Technische Oberflächenkunde" zu einem Sondergebiet entwickelt hat. Hier sei auf das Buch von G. Schmaltz [20] verwiesen. Bei den in den Vereinigten Staaten von Amerika entwickelten Verfahren zum

Feinzieh-

schleifen (Superfinish) [21] werden die Schleifsteine mit verhältnismässig geringem Anpressdruck ([illegible] 1kg/cm^2) gegen das umlaufende Werkstück (Welle oder Bohrung) angedrückt und dabei in axialer Richtung schnell und mit kurzen Hüben hin und her bewegt. Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt 6 bis 20 m/min, die Rauhigkeit der Oberfläche wird auf 0,2 µ heruntergedrückt. Wird die Härte des Schleifsteines sorgfältig auf die Härte des Werkstückes abgestimmt, so dass zum Schluss des Arbeitsganges Fläche auf Fläche arbeitet, werden Rauhigkeiten von 0,1 µ erreicht (Feinstziehschleifen).

2. Die Bearbeitbarkeit

Fast alle Bearbeitung geschieht an der Oberfläche. Deshalb muss in diesem Bericht auf die Beziehung zwischen der Bearbeitbarkeit und der Oberflächenbeschaffenheit eingegangen werden. "Bearbeitbarkeit" ist ein Sammelbegriff. Die Bearbeitungen durch Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen u.a. beanspruchen den Werkstoff verschieden und erfahren daher auch verschiedenen Widerstand. Man erhält verschiedene Zahlenwerte für die Standzeiten und den Kraftbedarf [illegible] verschiedenen Bearbeitungsarten und muss deshalb unterscheiden zwischen der "Drehbarkeit", "Fräsbarkeit", "Schleifbarkeit" usw. Solche ausführliche Darstellung würde aber in Rahmen dieses Berichtes zu umfangreich sein. Im speziellen Teil B dieses Berichtes (Seite 32 u. folgende) wird daher der zusammenfassende Begriff "Bearbeitbarkeit" beibehalten. Jedoch wird bei Zahlenangaben mitgeteilt, mit welcher Bearbeitung [illegible] diese festgestellt sind.

3. Die Lagerreibung

a. Der Gefügeaufbau der Lagermetalle

Von jeher galt die Auffassung, dass ein Lagermetall aus harten Einlagerungen in einer weicheren Grundmasse bestehen soll. Diese Meinung wird durch die Erfahrung bestätigt, denn alle guten Lagermetalle sind so aufge-

baut. Zur Deutung dieser Tatsache sind die Kugellager zum Vergleich herangezogen worden. Ebenso wie die Kugeln nur mit wenigen Punkten trügen, nahmen auch nur die wenigen aus der Oberfläche hervorstehenden harten Bestandteile die Lagerkräfte auf. Diese Meinung scheint den Verfassern abwegig zu sein, denn der Vorteil der Kugellager besteht in der rollenden Reibung. Die harten Teile der Lagermetalle sind aber nur auf gleitende Reibung beansprucht. Sobald sie ausbröckelnd ins Rollen kämen, würden sie das Lager zerstören. Wenn nur die hervorstehenden harten Bestandteile trügen, so würde auf ihnen die Flächenpressung und damit der Reibwiderstand vervielfacht. Man hat offenbar die Bedeutung der Ölschmierung nicht genügend berücksichtigt. Die etwas vertiefte Oberfläche der weicheren Grundmasse wirkt als viel verzweigte, alle Stellen der Lager bedienende Oelnut. Der tragende Ölfilm bleibt in der ganzen Lagerfläche erhalten und überzieht sowohl die etwas hervorstehenden harten Einlagerungen als auch die etwas vertiefte weichere Grundmasse. Die Flächenpressung entspricht also den aus der Grösse der Schalenoberfläche berechneten Werten. In einem ungeschmierten trockenen Lager würde eine aus harten und weichen Bestandteilen aufgebaute Schale sich wegen ihrer Rauhigkeit und der vergrösserten Reibung auf den hervorstehenden harten Teilen ungünstiger verhalten als eine homogene. In der Literatur wird ferner die Ansicht vertreten, dass die Vertiefung der weicheren Grundmasse sich erst im Lagerbetrieb bilde, weil beim Einlaufen der weichere Gefügebestandteil stärker abgenutzt würde. Man geht also von der Vorstellung aus, dass nach der Fertigung des Lagers die harten und weichen Bestandteile in einer idealen Zylinderfläche liegen. Auch diese Auffassung scheint den Verfassern unrichtig zu sein. Sie geht von der begrifflichen Vorstellung einer Zylinderfläche aus und setzt voraus, dass eine solche ideale Fläche bei der

Lagerfertigung verwirklicht werden könnte. In Wirklichkeit besteht heute keine technische Möglichkeit, aus einem heterogenen Werkstoff eine ideale Zylindermantelfläche herzustellen. Bei der Bearbeitung, insbesondere durch Schleifen und Polieren, wird notwendigerweise die weichere Grundmasse mehr abgearbeitet als die harten Einlagerungen. Die Niveauunterschiede sind also schon vor dem Einlaufen des Lagers vorhanden. Wenn sie nicht schon bestünden, so könnten sie beim Einlaufen nicht entstehen, weil eine stetige Fläche eine zweite ebenfalls stetige nicht unstetig abnutzen kann. Die für Lagersch Lagerschalen günstige Oberflächenform mit hervorstehenden harten Einlagerungen in vertiefter weicherer Grundmasse entsteht also schon bei der Lagerschalenfertigung und bewirkt dann im Lagerbetrieb eine gleichmässige Ölbenetzung.

b. Ölfilm. Grenzreibung, Verschleissreibung

Das wesentliche Moment für den Lagerbetrieb ist also die Schmierung. Auf diesem Gebiete der Technisch-wissenschaftlichen Forschung ist in den letzten Jahren viel gearbeitet worden. Die älteren Vorstellungen über Notlauf und Verschleiss der Lager sind überholt und haben neuen Auffassungen Platz gemacht, in denen die Eigenschaften und Wirkungen des Epilamens in Vordergrund stehen. [Epilamen] Die folgenden Darstellung folgt der klaren und durch ausführliche Versuche gestützten Beschreibungen von H. Lüpfert [22]:

Die fetten pflanzlichen Schmieröle bestehen aus langen Kettenmollekülen. Diese werden mit ihrem einen Ende an die Metalloberfläche gebunden, wobei Metallatome in die Fett-Moleküle eintreten. Es findet also eine Art Verseifung des Metalls statt. Die Fettmoleküle lagern sich mit ihren Kettenachsen winkelrecht zur Metalloberfläche, wobei sie dicht und lückenlos aneinander anschliessen. Das Epilamen ist nach dieser Auffassung eineArt dichter

Behaarung der Metalloberfläche durch die Ölmoleküle, die eine dünne, viskose und zugleich fixierte, also zähe Schicht bilden.

In gut gewarteten Maschinen ist eine reichliche Ölzufuhr vorhanden. Dann bildet sich bei Umlauf der Lager eine unter dynamischem Druck stehende zusammenhängende Ölschicht, die gemäss der hydrodynamischen Lagertheorie alle Kräfte aufnimmt und überträgt. Das Epilamen bleibt unangegriffen, und die Art der Lagermetalle kommt nicht zur Geltung. Der dynamisch tragende Ölfilm fehlt beim Anlaufen der Maschinen und bei mangelnder Ölzufuhr. Dann muss das Epilamen die Lagerkräfte aufnehmen, und die Reibung und die Erwärmung sind wesentlich grösser. Die Natur des Lagermetalles kommt zur Geltung, da ja von ihr die Bindung und der Aufbau des Epilamens abhängt und da die metallische Grenzschicht von ungewöhnlich hohen Kräften unter Erwärmung beansprucht wird. Diese Lagerbeanspruchung bezeichnet man als "Grenzreibung". Wird aber die Ölmenge so gering, dass das Epilamen nicht mehr dicht schliesst, sondern lückenhaft und untermischt mit anderen Flüssigkeiten oder Gasen ist, so setzt alsbald die Reiboxydation ein. Das Metall wird oxydiert. Es entsteht Verschleissstaub, der trocken reibt. Hervorstehende Metallteilchen bröckeln ab. Diese Beanspruchung der Lager bezeichnet man als "Verschleissreibung". Ein Umlauf völlig ohne Öl ist ordnungsmässig nicht möglich, da das Lager sofort fressen würde, indem Welle und Schale verschweissen bzw. die Schale schmilzt. Die Güte der Lagermetalle ist danach zu beurteilen, wie sie sich bei der Grenzreibung und der Verschleissreibung verhalten.

4. Der Verschleiss

Unter Verschleiss versteht man die mechanische Abnutzung der Oberflächen durch reibende feste Körper. Die Abnutzung durch strömende Flüssigkeiten wird als Erosion, die Aushöhlung durch tropfende Flüssigkeiten

wird als Kavitation bezeichnet, den chemischen Angriff ohne mechanische Kräfte nennt man Korrosion. Beim Verschleiss sind zwei Fälle zu unterscheiden:
1. die mechanische Abnutzung geschmierter Reibflächen,
2. die mechanische Abnutzung ungeschmierter Aussenflächen. Beispiele für je mechanische Abnutzung ungeschmierter Aussenflächen sind der Walzenverschleiss in Walzwerken, der Verschleiss der Eisenbahnschienen und Eisenbahn-Radreifen und die Abnutzung der Raupen in Traktoren und Panzerwagen. Solcher mechanischer Abrieb ungeschmierter Aussenflächen tritt im Motorenbau nur in untergeordnetem Masse auf. Hierhin gehört etwa der Verschleiss der Antriebsflächen von Transmissionsrädern oder von ungeölten Kupplungen. Im Motorenbau handelt es sich vorzugsweise um die mechanische Abnutzung geschmierter Reibflächen, nämlich dem Verschleiss der Lager und Führungen. Die Drücke in geschmierten Führungen sind meist so gering, dass ein Verschleiss praktisch nicht eintritt. Zu betrachten bleibt also der Verschleiss der Reiblagerteile. Da der Verschleiss der Maschinenlager unabwendbar ist, würden sowohl die Lagerwelle als auch die Schalen in gleicher Weise angegriffen werden, wenn man beide aus Stahl fertigen würde. Bequem und wirtschaftlich auswechselbar sind nur die Schalen. Deshalb fertigt man diese aus Metallen, die weicher und abnutzbarer als Stahl sind, und erreicht dadurch, dass die Lagerwellen unangegriffen bleiben. Aus Stahl sind daher nur die Wellen, niemals aber die Lagerschalen hergestellt. Der Verschleiss betrifft nur die Schalen, die Wellen werden nur angegriffen, wenn ein Lager frisst. Die Verschleissfestigkeit der Stahloberflächen erfordert daher in diesem Bericht keine besondere Betrachtung. Der Verschleiss der Lagermetalle wird im speziellen "Teil B, Abschnitt "Lagermetalle" (Seite 57 u.folgende behandelt werden.

5. Die Korrosion

Die Korrosion ist ein auf der Oberfläche beginnender elektrochemischer Vorgang. Sobald das Metall von einem Elektrolyten benetzt wird - dies ist praktisch bei jeder wässerigen Befeuchtung der Fall -, entstehen elektrische Lokalströme zwischen den heterogenen Bestandteilen der Oberfläche (Abschnitt "Es gibt technisch kein homogenes Metall" Seite 17). Bei der Ungleichartigkeit und mitunter ungleichmässigen Verteilung der Heterogenitäten ergreift die Korrosion nicht gleichmässig die Oberfläche, sondern in der Regel ungleichmässig. Am gefürchtetsten ist der sogenannte "Lochfrass". Die Korrosion beginnt in diesem Falle nur an wenigen Punkten der Oberfläche und schreitet von hier aus in die Tiefe fort. Auf einer Stahloberfläche führt bereits eine Verschiedenheit der hinzutretenden Luftsauerstoffmenge zu einer die Korrosion fördernden Heterogenität. Man spricht von verschiedener "Belüftung" Der Boden einer durch örtliche Korrosion entstandenen kleinen Vertiefung bleibt unbelüftet. Er wirkt dann elektrochemisch als Anode gegen die übrige Oberfläche. Im Boden der Vertiefung fliesst ein dichter Lokalstrom, der den Lochfrass hervorruft. Ungünstig ist auch die "interkristalline Korrosion", welche an den Korngrenzen der Oberfläche einsetzt und von hier aus auf den Korngrenzen der Metallkörner ins Innere vordringt. Am wenigsten gefährlich ist eine Korrosion, die, gleichmässig angreifend, die gesamte Oberfläche allmählich abträgt.

6. Temperaturwirkungen

a. Abkühlung

Die meisten Stähle haben etwa bei Zimmertemperatur den Steilabfall der Kerbzähigkeit. Bei Abkühlung auf Temperaturen unter 0° C verspröden sie. In scharfer Winterkälte können z.B. Eisenbahnschienen, wenn sie befahren werden, brechen, nur bei besonders sorgfältig

desoxydierten und mit etwas Aluminium (bis 0,2%) legierten Stählen, z.B. dem Krupp'schen I-Z-Stahl, beginnt der Steilabfall der Kerbzähigkeit im Gebiet so tiefer Temperatur, dass die Stähle auch bei Winterkälte zäh bleiben. Motorteile aus Stahl sind daher meist gegen Temperaturen, die stark unter 0° C liegen empfindlich und würden während solcher Abkühlung ihre Zähigkeit verlieren. Kupfer- und Aluminium-Legierungen besitzen diese Kältesprödigkeit nicht. Mit einer starken zur Versprödung des Stahles führenden Abkühlung muss nur in Sonderfällen gerechnet werden (Flugzeuge, Maschinen in Polargegenden). Eine ganz allgemeine Schädigung auch durch mässige Abkühlung besteht in der Erhöhung des Korrosionsangriffes. In ungeheizten Räumen oder an freier Luft beschlagen sich die Metallteile mit Wassertröpfchen, die dann bei Erwärmung wieder verdunsten. Bei der Verdunstung reichert sich in den Tröpfchen der Sauerstoff- und Kohlensäuregehalt bis zur Übersättigung an. Auch die nur spurenweise in den Tröpfchen gelösten elektrolytbildenden Salze gelangen bei Verdunstung zu korrodierenden Konzentrationen. Ein oft wiederholtes Betauen und Trocknen begünstigt deshalb sehr die Korrosion.

Wenn ein Motor stark abgekühlt ist und man ihn dann wieder warm laufen lässt, so geschieht seine Erwärmung ungleichmässig. Das Spiel über den Reibflächen, durch die Kontraktion bei der Abkühlung schon etwas verkleinert, muss bei ungleichmässiger Erwärmung ungleichmässig werden. Auch können infolge verschiedener Wärmeausdehnung von bewegten oder ruhenden Teilen Kantenpressungen auftreten, während zugleich infolge der höheren Viskosität der Schmiermittel die Leerlaufkraft erhöht ist. Jedes Warmlaufenlassen nach starker Abkühlung führt deshalb zu einer übermässigen Beanspruchung der reibenden Oberflächen. Man sucht deshalb, die Maschinen möglichst vor starker Abkühlung zu bewahren.

b. Erhitzung.

Zu akuter Schädigung der Oberfläche kann eine Überhitzung führen. Wenn die Lager so heiss werden, dass das Öl verdampft und schliesslich auch das Epilamen vergast wird, so ist, wenn der Motor nicht sogleich still gesetzt wird, ein Fressen der Lager und damit die Zerstörung der reibenden Oberflächen unausbleiblich. Einzelne Konstruktionsteile, z.B. Auspuffventil-Teile, müssen regelmässig hohe Temperaturen ertragen. Zu ihrem Bau wendet man warmfesten und zunderfesten Werkstoff an. Näheres hierüber wird im speziellen Teil B, Abschnitt "Stahl", insb. Seite 34 und Tafel 2, berichtet.

B. Spezieller Teil

I. Stahl

1. Der Gefügeaufbau

Die Gefügekunde des Stahles hat sich zu einer Sonderwissenschaft entwickelt. Eine umfassende Darstellung haben die Verfasser in ihrem Atlas Metallographicus [2] niedergelegt. Im Rahmen dieses Berichtes kann nur eine kurze Übersicht gegeben werden.

a. Nicht gehärteter Kohlenstoffstahl

Gefügebestandteile:

Ferrit, Perlit, Schlackeneinschlüsse, in Sonderfällen auch Temperkohle.

Grossgefüge (Makrostruktur):

Korngefüge, Netzgefüge, Widmannstätten'sches Gefüge, primäres und sekundäres Tannenbaumgefüge, Globulargefüge, primäres und sekundäres Zeilengefüge, Kaltstreckgefüge.

Kleingefüge (Mikrostruktur):

Ferrit in Körnern, als Netz oder Flecken; Ferrithöfe, streifiger Perlit verschiedener Ausbildung; körniger Perlit verschiedener Körnung, Korngrenzenzementit; sekundäre Zementitnadeln; tertiärer Zementit, bzw. auch Nitrid; Kristallseigerung des Phosphors; Silikat-, Oxyd-, Sulfidschlacken. In kaltgereckten Stählen: Gleitschichten, Gleitpakete, [illegible] Rekristallisationsgefüge.

Die Körner der ferritischen Grundmasse sind meist abgerundet, in den ungeglühten Widmannstätten'schen Gefügen zackig.

b. Gehärteter oder vergüteter Kohlenstoffstahl

Gefügebestandteile:

Austenit, Martensit, Troostit, Ferrit, Zementit, Schlackeneinschlüsse, in Sonderfällen auch Temperkohle.

Grossgefüge:

Randschicht, Übergangsschicht, Kernschicht.

Kleingefüge:

Austenit und Martensit verschiedener Form und Gestalt. Troostit in mannigfacher Ausbildung, Zementit körnig mit verschiedener Korngrösse, Anlassgefüge, Vergütungsgefüge, Zwischengefüge.
Die Körner der Grundmasse sind nadelig und zackig.

c. Sonderstahl

Zu den unter a und b genannten Gefügebestandteilen und Gefügeformen treten Sonderkarbide, Metallide und Eutektika hinzu.

Die Gefügemerkmale des Stahles sind so vielseitig und so eindeutig mit der Erzeugung und Vorbehandlung verknüpft, dass man aus der Gefügebeobachtung nachträglich das Herstellungsverfahren und die Bearbeitung des Stahles feststellen kann. Ein erfahrener Metallograph vermag die gesamte Vorgeschichte eines Stahlgegenstandes aus der Beschaffenheit des Gefüges zu ermitteln. Der Gefügebefund gestattet ferner meist ein Urteil über die mechanischen und chemischen Eigenschaften des Stahles und lässt die Ursachen für Fehler des Stahles erkennen.

2. Die Korrosion der Stahloberflächen

An feuchter Luft und in sauerstoffhaltigem Wasser bilden sich an der Oberfläche von Eisen und Stahl alsbald Hydroxyde und Oxyde, die leider nicht wie das Aluminiumoxyd auf dem Aluminium eine dichte festhaftende Haut bilden, sondern locker, luft- und wasserdurchlässig sind. Das Rosten geht also weiter bis in den Kern der Stücke, Die den vorgeschichtlichen Gräbern ehemals beigegebenen Eisenwaffen und -geräte bestehen heute, wenn sie noch an Ort und Stelle liegen, völlig aus Eisenoxyduloxyd (Karbonaten u.a.) Nägel in feuchten Zäunen rosten mitunter schon in Jahresfrist

durch. Andererseits tun einige Eisenketten an Zugbrücken und eiserne Truhenschlösser oder Tore aus dem Mittelalter heute noch ihren Dienst. Eiserne Eisenbahnschwellen halten jahrzehntelang, und die Eisenbahnschienen werden nicht so sehr durch Rost als durch Verschleiss unbrauchbar. Kleine Unterschiede in der Herstellung und Legierung des Stahles haben offenbar einen grossen Einfluss auf die Rostgeschwindigkeit, z.B. scheinen kleine Kupfergehalte das Rosten zu verzögern. Ausschlaggebend sind die örtlich so verschiedenen Korrosionsbedingungen. In Seeluft und Seewasser vergeht Eisen schnell. In der rauchigen, sauren Industrieatmosphäre korrodiert es viel schneller als in reiner Landluft. In den meist trockenen staubarmen Räumen, in denen Motoren aufgestellt sind, braucht man die Korrosion nicht zu fürchten. Sie könnte dort nur auf den Reibflächen stören. Die übrigen an der Atmosphäre liegenden Oberflächen der Maschinenteile würden ohne Pflege mit der Zeit durch Korrosion ihr schmuckes Aussehen verlieren, ihre Haltbarkeit aber würde innerhalb der Lebensdauer der Maschinen nicht beeinträchtigt werden. Stärker durch Korrosion gefährdet sind eiserne, im Freien arbeitende Apparate, z.B. Baggerketten, Teile von Seilbahnen u.dergl., im Maschinenbetriebe dagegen, ausser den schon erwähnten Reibflächen, nur einige von feuchtem Dampf oder Abgasen betroffene Teile (Turbinenschaufeln, Abwasserleitungen, Auspuffventile, Kaminteile u.a.)

a. Die Passivität des Eisens

Das viel unedlere Aluminium und ebenso das elektronegativere Magnesium überziehen sich an ihrer Oberfläche in Luft und Wasser alsbald mit einer dichten Oxydhaut, die eine weitere Korrosion verhindert. Auch das Eisen vermag unter bestimmten Bedingungen eine solche die Korrosion hemmende Haut zu bilden. Wenn man Eisen in konzentrierte Salpetersäure bringt, so färbt es sich etwas dunkler und wird von der Säure nicht

angegriffen. Man kann konzentrierte Salpetersäure in eisernen Gefässen aufbewahren. Das Eisen ist "passiv" geworden. Es hat sich mit einer festhaftenden, dichten Oxydhaut besonderer Art überzogen. Diese Oxydschicht ist sehr dünn und besteht nur aus einigen Atomschichten. Bei Einwirkung reduzierender Ionen (Salzsäure, Chloride) wird sie zerstört. Offenbar vermag das Eisenoxyd in zwei verschiedenen Formen zu entstehen. Etwas Ähnliches liegt beim Blei vor. In Schwefelsäure bildet sich auf den Bleioberflächen in der Regel ein weisses durchlässiges Sulfat, so dass das Metall von der Säure zerfressen wird. In bestimmten Fällen aber entsteht eine korrosionshemmende Sulfathaut aus dunkel gefärbtem Anglesit [10]. Besondere Neigung, passiv zu werden, hat das Chrom. Durch die umwälzende Erfindung von Prof. E. Maurer ist erkannt worden, dass Eisen-Chrom-Legierungen mit mehr als 12 % Chromgehalt an der Luft und im Wasser passiv sind. Diese sind die "nichtrostenden Stähle". Da ihre Korrosionsfestigkeit auf der dünnen Oxydhaut beruht, mit der sie sich sofort überziehen, so sind sie anfällig gegen Chloridionen und reduzierenden Säuren. Durch Erhöhung des Chromgehaltes und beträchtlichen Nickelzusatz lässt sich ihre Widerstands~~kraft~~fähigkeit erhöhen, und ein Molybdänzusatz macht sie sogar ziemlich unempfindlich gegen Königswasser. Das grosse Anwendungsgebiet dieser Stähle ist der Apparatebau. Die meisten Konstruktionsteile im Motorenbau sind, wie schon erwähnt, keiner hohen Korrosionsgefahr ausgesetzt.

b. Korrosion in der Wärme, Warmfestigkeit

An einigen korrosionsgefährdeten Stellen des mittleren Maschinenbaues wirkt nicht nur Korrosion, sondern zugleich auch hohe Temperatur auf die Oberfläche ein, z.B. in Auspuffventilen. Die an solchen Stellen angewandten Stähle müssen nicht nur korrosionsfest, sondern auch mechanisch warmfest und zunderfest sein. Der Vollständigkeit halber sei in Zahlentafel 2 eine Über-

sicht über die warmfesten und z.T. dabei korrosions- und zunderfesten Stähle angegeben:

Gegenwärtig versucht man, durch Zulegieren von Niob, Titan und [illegible] die Warmfestigkeit noch mehr zu steigern.

c. Schutzüberzüge

Die Anwendung der nichtrostenden Stähle ist für die meisten Zwecke zu kostspielig. Man schützt in einfacher Weise die nicht oder wenig beanspruchten Oberflächen durch korrosionsfeste Überzüge. Gemäss der einleitend dargelegten Abgrenzung des Themas werden hier die Schutzüberzüge nicht ausführlich behandelt. Es sei nur ein kurzer Überblick über metallische Schutzschichten gegeben. Die aufgebrachten Schutzschichten sind entweder elektrochemisch edler als das Eisen (z.B. bei Vernickelung, [illegible], Verchromung u.dgl.) oder unedler (z.B. bei der Verzinkung). Die edleren Überzüge sind korrosionsfester als das Eisen und geben einen guten Korrosionsschutz, solange sie dicht bleiben. Sobald sich aber Löcher und Risse bilden, entsteht an der Fehlstelle ein elektrochemischer Lokalstrom zwischen der Schutzschicht und dem Stahl. Das unedlere Eisen wird bei Befeuchtung der Fehlstellen mit einem Elektrolyten zur Anode und die Schutzschicht zur Kathode. Das Eisen wird dann stark angegriffen. Wenn sich Rostflecke in einer Verzinnungsschicht gebildet haben, kann man sie nicht beseitigen, sondern muss neu verzinnen. Ein unedlerer Überzug wird zwar mit der Zeit selbst korrodiert, aber auch wenn dann die Eisenoberfläche teilweise entblösst ist, bleibt sie noch geschützt. Jetzt wird nämlich das edlere Eisen zur Kathode. Die Korrosion verzehrt auch weiterhin nur die unedlere Schutzschicht und lässt das Eisen unangegriffen.

Für den [illegible] wird der Stahl mitunter

plattiert. Die Plattierung mit Messing oder Bronze ist technisch gut durchgearbeitet, die Plattierung mit Aluminium ist aber eine ungelöste Aufgabe. Ausser metallischen Schutzschichten werden vielfach nichtmetallische Überzüge verwendet (Lacke, Mennige, Farbenanstrich, Oxydschichten, Phosphatschichten u.a.).

3. Die Seigerung des Stahles

Besondere Bedeutung für die Oberflächenbeschaffenheit des Stahles hat die Seigerung. Beim Erstarren von Stahlblöcken und -Gusstücken entmischt sich die Legierung dergestalt, dass die Aussenschicht sich an Eisen anreichert, während die Restschmelze im Kern der Stücke mit erhöhtem Gehalten an Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel und den anderen Legierungsbestandteilen erstarrt. Im Seigerkern kann der Phosphorgehalt örtlich auf das Zehnfache und mehr zunehmen, der Kohlenstoffgehalt um ca. 100 %, auch alle anderen Bestandteile, z.B. Mn, Si, Cr, Ni, u.a., sind etwas angereichert. Zugleich sammelt sich in der Restschmelze die Schlacke an, auch können hier bevorzugt porige oder löcherige Stellen entstehen. Die vom Rande in die Schmelze verwachsenden Kristalle schwinden bei der Erstarrung, daher wird die vor den Kristallen befindliche Schmelze zum Rande gezogen. Geschieht die Erstarrung nach dem Zweiphasen-Gleichgewicht Mischkristall-Schmelze, (Fall 1) so wachsen dabei die Kristalle so lange weiter an, bis sie alle Zwischenräume ausgefüllt haben. Dann kann keine weitere Schmelze mehr zum Rande hinfliessen. Gelangt aber die Erstarrung in ein Dreiphasen-Gleichgewicht Mischkristall-Eutektikum, (Fall 2), so kann die zum Rande geströmte Schmelze nicht zu Mischkristallen erstarren, sondern muss ein Eutektikum zwischen den zuerst erstarrten Kristallen bilden. Der Fall 1 wird als "normale Blockseigerung" bezeichnet. Die Anreicherung an Legierungsbestandteilen bildet sich dabei im Inneren der Gusstücke. Bei Fall 2 dagegen ergibt das zwischen den Mischkristallen erstarrende Eutektium

eben dort die Anreicherung der eutektischen Komponente. Der bei niedriger Temperatur schmelzende Bestandteil wird also am Rande angereichert. Dies bezeichnet man als "umgekehrte Blockseigerung". Die hier von den Verfassern gegebene einfache Deutung der normalen und umgekehrten Blockseigerung ist in der Literatur bisher nicht enthalten. Man hat mit Rücksicht auf die Leistung die Gehalte an den stark seigernden schädlichen Bestandteilen Phosphor und Schwefel so niedrig festgesetzt, dass sie sogar in den Seigerungsstellen trotz der hohen Anreicherung noch erträglich sind. Wenn der Phosphor überall gleichmässig im Stahl verteilt bliebe, so brauchte man seine Höchstgehalte nicht nach hundertstel Prozent zu bemessen. Die Seigerstellen sind härter und spröder, auch weniger gut schweissbar als die Aussenschichten.
Die Seigerung lässt sich mit den heutigen metallurgischen Verfahren nicht hindern und wird wohl niemals vermieden werden können, da sie auf den Gesetzmässigkeiten der Zustandsschaubilder beruht. Nur wenn die Stahlschmelze in allen ihren Punkten vor der Erstarrung bis unter ihre Soliduslinie unterkühlt werden könnte, müsste die Seigerung ausbleiben. Solche tiefe Unterkühlung scheint aber unmöglich zu sein. Der Konstrukteur muss also bei Stahl immer die Seigerung in Betracht ziehen. Bei richtig geleiteter Erstarrung der Stahlblöcke und Gusstücke liegt der Seigerkern im Inneren, während die Aussenschicht in ziemlicher Dicke gesund ist. Die Verarbeitung durch Walzen und Ziehen geschieht meist symetrisch, so dass dabei die Seigerung im Kern liegen bleibt. Man kann selbst im Schliff feinausgezogener Stahldrähte nur im Kern die Seigerung beobachten, während die Rinde der Drähte seigerfrei ist. Bei unsachgemäss geleiteter Erstarrung ungünstig geformter Stahlblöcke kann aber die Restschmelze stellenweise bis an die Oberfläche der Blöcke reichen, wenn z.B. scharfkantige Vierkantblöcke

sehr schnell erstarren, so erstreckt sich das Restschmelzengebiet bis an die vier Kanten. Die Verfasser untersuchten Eisenbahnschienen, die aus derartigen Blöcken gewalzt waren. In diesen trat die Seigerung an beiden Rändern der Schienenlauffläche und an beiden Seiten des Schienenfusses in vier Längsstreifen an die Schienenoberfläche. Auch bei der mitunter unvermeidlichen unsymmetrischen Formgebung durch Freihandschmieden oder Gesenkschmieden kann die Seigerung bis nahe an die Oberfläche gedrückt werden. Je näher die Seigerung der Oberfläche liegt, desto eher wird sie bei der spanabhebenden Bearbeitung angeschnitten. Die Späne brechen dann an diesen harten Stellen ab. Die Schneidwerkzeuge und mit ihnen die Werkzeugmaschinen erhalten Schläge. Auch wenn die Bearbeitung durchführbar ist, liegen in der fertig bearbeiteten Oberfläche härtere und schlackenreichere Stellen mit erhöhter Kerbempfindlichkeit.

4. Schlackeneinschlüsse

Auch eine ganz von Seigerstellen freie Stahloberfläche enthält in mikroskopischer Grössenordnung stets mehr oder weniger Fehlstellen, denn kein Stahl (auch kein anderes Metall, vielleicht mit Ausnahme von Edelmetallen, ist völlig schlackenfrei. Man mache sich aber von der Wirkung der unvermeidlichen winzigen Schlackeneinschlüsse keine übertriebene Vorstellung. Als die Technik bis vor 150 Jahren nur Schweisstahl kannte und noch keinen Gusstahl, enthielten alle Stahlerzeugnisse unverhältnismässig mehr Schlackeneinschlüsse als heute. Aber die Schwerter und Messer, die Drähte und Federn, welche man aus gutem Schweisstahl fertigte, waren vorzüglich. Nicht alle Schlacken wirken ungünstig. Feinverteilte Eisensilikatschlacke verhält sich mechanisch ähnlich wie der Zementit. Sie springt nicht aus und platzt nicht, sondern ist ein fester tragender Bestandteil des Klein-

gefüges. Ungünstig sind grosse Schlackenteile und Schlackenanhäufungen, wie denn ja auch Karbidanhäufungen und übermässig grosse Karbidkristalle vermieden werden müssen. Die eigentlich gefährlichen Schlacken hat erst der Gusstahl gebracht, nämlich die Sulfidschlacke und die höher gebauten Oxyde.
Der Anspruch an Schlackenarmut an der Oberfläche ist sehr verschieden nach dem Verwendungszwecke der Werkstücke. Hohe Anforderungen an Schlackenreinheit stellt z.B. die Erzeugung der Kugellagerteile. Bei den nur mit einem Differential ihrer Oberfläche tragenden Kugeln kommt es auf völlige Gleichmässigkeit des Werkstoffes an. Deshalb ist zuerst von den Kugellagerfabriken die Abnahmeprüfung auf Schlackengehalt eingeführt worden. Man vergleicht das mikroskopische Gefügebild des abzunehmenden Stahles mit "Gefügerichtreihen [29]. Diese enthalten die Gefügebilder von Stählen mit bekannten abgestuften Schlackengehalt. Man gewinnt so eine Vergleichzahl, die eine Bewertung der Stähle bei der Abnahmeprüfung gestattet.

5. Die Bearbeitbarkeit

Die erste Bedingung für gute Bearbeitbarkeit des Stahles ist gleichmässige Härte und Zähigkeit. Schon im Abschnitt "Die Seigerung des Stahles" (Seite 39/40) war darauf hingewiesen worden, dass Ungleichmässigkeiten der zu bearbeitenden Oberfläche durch Seigerung verursacht werden können. Zu erstreben ist, dass die Abkühlung der Stücke nach dem Glühen und Vergüten an allen Stellen gleich schnell bzw. gleich langsam geschieht. Jede Änderung in der Abkühlungsgeschwindigkeit ändert die Härte in dem Sinne, dass bei beschleunigter Abkühlung die Härte grösser wird.
Wesentlich für die Bearbeitbarkeit aller Stähle mit Kohlenstoffgehalten über etwa 0,2% ist die Form der Karbidausbildung.

Der lamellare Perlit macht den Stahl härter als der körnige. Die Bearbeitbarkeit wird durch lamellaren Perlit so sehr erschwert, dass Kohlenstoffstähle von etwa 0,45% an wirtschaftlich nur bearbeitet werden können, wenn ihr Perlit körnig ist. Übereutektoidische Stähle mit Zementitnetz erhalten selbst bei verhältnismässig hoher Schnittgeschwindigkeit noch eine rauhe Oberfläche, während bei körnigem Perlit leicht eine glatte Oberfläche erzielt wird[30]. Für die Bearbeitung auf automatischen Drehbänken ist ein spritziger Span erforderlich. Weicher Stahl hat einen langen, lockigen, für Drehautomaten ungeeigneten Span. Man versprödet deshalb absichtlich den Stahl, z.B. durch Legierung mit etwas Schwefel oder Phosphor, so weit, dass der Span spritzig wird, ohne dass die Versprödung die mechanische Brauchbarkeit des Stahles beeinträchtigt. Dies geschieht z.B. bei Stahl für Schraubenmuttern. Mit dem gleichen Ziele versprödet man das Aluminium durch Zusatz von Blei.

II. Grauguss

1. Der Gefügeaufbau

Eine ausführliche Darstellung des vielgestaltigen Gefüges von Gusseisen enthält der von den Verfassern herausgegebene Atlas Metallographicus[31]. Hier kann nur ein kurzer Überblick über das Gefüge von Grauguss gegeben werden.

Gefügebestandteile:

Perlit, Ferrit, Zementit, Graphit, Temperkohle, Ledeburit, Steadit, Karbide und Metallide, Schlackeneinschlüsse.

Gesamtanordnung:

Tannenbaumkristalle, heterpgenes und entartetes Graphiteutektikum in sehr mannigfachen Formen und Ausbildungen, Ferritinseln, Steaditnetz.

Einzelausbildung:

Graphit in mannigfachen Formen und Grössen, Perlit in verschiedener Ausbildung, Sekundär-Graphit, Temperkohle, eutektoidischer Ferrit, Ledeburit, Steadit, Nitrid, Ferrocyantitan, u.a. Schlackeneinschlüsse, insbesondere Mangan-Sulfid-Schlacke.

Das Gefügebild der verschiedenen Graugußsorten (Maschinenguss verschiedener Art, Kokillenguss, Kunstguss u.a.) ist deutlich unterschieden. Man kann aus der Gefügebeschaffenheit ziemlich sichere Schlüsse auf die mechanischen Eigenschaften ziehen.

2. Gusshaut, Randschicht, Hauptschicht

Man unterscheidet an Graugusstücken von aussen nach innen die Randschicht mit der Gusshaut, die Hauptschicht und bei dicken Stücken die Innenschicht. Die Gusshaut ist etwa 0,2 bis 0,5 mm dick. Die Randschicht beträgt 25% der Entfernung von der unbearbeiteten Oberfläche bis zur Mitte der Wand, mindestens aber 1 mm, höchstens 5 mm von der unbearbeiteten Oberfläche aus nach innen. Die Hauptschicht beträgt bis 15 mm vom Ende der Randschicht aus nach innen. Unter Innenschicht versteht man bei dicken Stücken den unterhalb der Hauptschicht liegenden Teil. An Gleit- und Passstellen werden durch Bearbeitung die Gusshaut und die Randschicht entfernt, so dass dort die Hauptschicht an der Oberfläche liegt. Für Abnahmezwecke entnimmt man die Schliffe zur metallographischen Untersuchung aus der Hauptschicht der Probestäbe. Die Schliffe sind dabei so zu legen, dass die Proben an den Stellen beobachtet werden, die dem massgebend beanspruchten Ort des Gusstückes entsprechen. Wollen der Hersteller oder der Verbraucher den Gefügezustand in den Gusstücken feststellen, so sind auch hier die Schliffe so zu entnehmen, dass sie die massgebend beanspruchten Stellen enthalten, z.B. bei Zylindern unmittelbar unter der Laufbahn.

3. Die Gleiteigenschaften

Seit jeher hat sich Grauguss als ein geeigneter Werkstoff für Lagerschalen erwiesen. Über die günstigste Graugussart für die Verwendung zu Lagerschalen waren die Meinungen geteilt. Angewandt wurde zuerst der früher allgemein erzeugte Grauguss mit Ferrit und Perlit als Grundmasse bei grober Graphitausbildung. Versucht wurde auch die Einführung eines geglühten Gusseisens, das nur aus Ferrit und Graphit bestand. A. Diefenthäler und K. Sipp[32], von der Firma H. Lanz, Mannheim, wiesen dann darauf hin, dass ein Grauguss ohne Ferrit, der nur aus Perlit, Graphit und Steadit aufgebaut ist, die besten Gleiteigenschaften habe. Die Vorzüge dieses sogenannten "Perlitgusses" als Lagermetall und überhaupt als verschleissfestes Gusseisen sind jetzt allgemein anerkannt. Durch zahlreiche Versuche[33,34,35] und nach langen technischen und Patent-Streitigkeiten[36] ist nun erwiesen, dass ein guter Lagergrauguss aus einer perlitischen, praktisch ferritfreien Grundmasse mit reichlich eingelagerten feinen Graphitblättchen bestehen soll. Solcher Grauguss enthält stets auch ein Steaditnetz. Auf diese Tatsache wird wenig hingewiesen! Perlitguss entsteht, wenn sich ein Grauguss mit niedrigem Siliziumgehalt von etwa 750° an so schnell abkühlt, dass die eutektoidische Graphitkristallisation unterbleibt und nur das metastabile Eutektoid Eisen-Zementit entsteht. Diese Abkühlungsweise verursacht zugleich eine ziemlich feine Perlitausbildung. Die Festigkeit und die guten Verschleiss- und Gleiteigenschaften des Perlitgusses beruhen vielleicht nicht nur auf der Abwesenheit von Ferrit, sondern auch auf der Dichtheit und Feinkörnigkeit des Perlites.

Der Graphit ist wesentlich weicher als der Perlit und liegt deshalb immer etwas vertieft in der bearbeiteten Oberfläche. Er bildet Mikronuten für die Ölzufuhr im Lager, zugleich wirkt feinabgeschilferter

Graphitstaub schmierend. Durch besonders beschleunigte Abkühlung im Temperaturgebiet zwischen 750° und 550° kann man eine besonders feine Perlitausbildung bewirken. Solche Perlitform bezeichnet man als Sorbit. Sorbit scheint die beste Gefügeform für die Grundmasse des Zylindergusses zu sein. Eine Legierung mit Mn, Cr oder Ni fördert die Sorbitbildung. Eine ausführliche Darlegung über Grauguss für Zylinder gibt H. Meininger. [37]

4. Die Bearbeitbarkeit

Das wesentliche Merkmal des Graugusses ist die reichliche Einlagerung des weichen, bröckeligen Graphites. Denkt man sich einmal den Graphit fort, so dass der Grauguss nur aus seiner metallischen Grundmasse bestünde, so wäre er gleich einem Sonderstahl mit etwa 2% Si, 0,5% Mn, 0,5 % P, mit lamellarem Perlit, viel hartem Steadit und ziemlich viel harten Schlacken. Ein solcher Stahl wäre besonders schlecht bearbeitbar. Der Graphit aber macht diese Metallmasse bei der Bearbeitung bröcklig. Die Späne sind kurz und spritzig. Der Grauguss ist daher gut bearbeitbar, da die Metallmasse vor der Bearbeitungsschneide immer wieder kurz abbricht. Bestehen bleibt aber die Abnutzung der Schneide durch die Härte der metallischen Grundmasse. Deshalb sind die Standzeiten geringer als bei Bearbeitung von Stahl, gl. Abb.3 und Abb. 4. Aus den beiden Bildern geht ferner hervor, dass die Zerreissfestigkeit keine geeignete Bezugsgrösse für die Bearbeitbarkeit von Grauguss ist. Zutreffender ist die Beziehung auf die Härte, Abb. 4. Aber auch bei Zuordnung von Härte und Bearbeitbarkeit gibt es ziemlich starke Streuungen. Offenbar wird die Bearbeitbarkeit von der Verteilung des Graphites beeinflusst. Nach Untersuchung von A. Wallichs und H. Dabringhaus [38] erwies sich ein Schleuderguss trotz verhältnismässig hoher

Festigkeit und Härte als besonders gut bearbeitbar. Im Schleuderguss ist der Graphit viel feiner unterteilt als im dem langsam erstarrenden Kastenguss.

5. Der Verschleiss

Ein Mass für die oben erwähnte besondere Wirkung der Graphitverteilung gibt die sogenannte "lineare Graphitdurchsetzung" [39]. Zur Ermittlung dieser Grösse zählt man die von einem Hilfsliniennetz geschnittenen Graphiteinschlüsse bei 75facher Vergrösserung aus. Die lineare Graphitdurchsetzung gibt auch ein Mass für den Verschleiss, vgl. Abb. 5, aus der Brinellhärte dagegen kann man nicht auf den Verschleiss des Graugusses schliessen. Abb. 6 zeigt, dass der Verschleiss zwischen Brinellhärten von ca. 170 bis 350 kg/mm^2 praktisch unabhängig von der Härte ist. Am verschleissfestesten ist Perlitguss, Ferriteinlagerungen erhöhen den Verschleiss, Abb. 7. Das Silizium ruft eine Verringerung des Verschleisses bei rollender Reibung hervor, die aber erst bei höheren Siliziumgehalten beträchtlich ist [40]. Steigende Phosphormengen im Gusseisen erhöhen die Verschleissfestigkeit [40,41], vgl. Abb. 8. Auch der Mangangehalt verringert in den üblichen Prozentsätzen den Verschleiss. Ebenso macht auch der Schwefel den Grauguss verschleissfester.

6. Die Korrosion

Gemessen gegen die Normalkalomel-Elektrode in 1%iger Kochsalzlösung [42] hat Eisen ein Potential von − 0,755 V, Graphit von + 0,372 V. Der Graphit hat also gegen die Eisengrundmasse eine Potentialdifferenz von etwa 1 V! Nach der elektrochemischen Korrosionstheorie müsste man eine sehr beträchtliche Korrosion für Grauguss erwarten. In der Tat löst sich in verdünnter Säure Grauguss viel schneller als Stahl, und man muss annehmen, dass auf einer Graugussfläche bei ihrer Beleuchtung sofort eine Korrosion durch die Lokal-

ströme zwischen Graphit und Eisen eingeleitet wird. Aber eine merkliche Korrosion kommt erst zustande, wenn solche Lokalströme andauern. Den elektrolytischen Strömen wirkt alsbald die Polarisation entgegen. Die kathodische Polarisation kommt zustande durch den auf der Kathode abgeschiedenen elementaren Wasserstoff. Der atomare Wasserstoff haftet hier mit einer "Überspannung", deren Höhe von der Natur der Kathode abhängt. Er unterbricht den Lokalstrom. Gerade der Graphit ergibt für Wasserstoff eine bedeutende "Überspannung" [43] . Hinzu kommt, dass die Verschiedenheit der "Belüftung" beim Rosten des Eisens das wesentliche Moment ist, das in seiner Wirkung die Tätigkeit der Gefügebestandelemente übertrifft. Unlegierter Grauguss ist daher von verdünnten Säuren leicht angreifbar, dagegen ist er bemerkenswert widerstandsfähig gegen Rostangriff. Gusseiserne Wasser- und Gasrohre, im Boden verlegt, tun ihren Dienst seit vielen Jahrzehnten. Man hat eine neue Dachbauweise unter Verwendung gusseiserner Dachplatten entwickelt [44] . In der Provinz Derby in England sind im Jahre 1927 über 500 gusseiserne Häuser aus genormten Gussplatten errichtet worden [45] . Seit altersher wird Grauguss als bevorzugter und haltbarer Werkstoff im Maschinenbau angewandt. Man braucht daher im Motorenbau unter üblichen Bedingungen die Korrosion von Grauguss ebenso wenig zu fürchten wie die von Stahl.

III. Leichtmetalle

1. Aluminiumlegierungen

a. Der Gefügeaufbau

Auch der Gefügeaufbau der Aluminiumlegierungen ist von den Verfassern für den Atlas Metallographicus ausführlich bearbeitet worden. Infolge des Krieges konnte aber erst ein Teil dieses Atlasbandes veröffentlicht werden [46] . Die folgende Übersicht gründet

sich in der Hauptsache auf bisher unveröffentlichte Untersuchungen.

Gefügebestandteile:

In Reinaluminium:

Aluminiummischkristall (α = Mischkristall) als Grundmasse mit eisen- und siliziumhaltigen Aluminiden in geringen Mengen.

Im Aluminiumlegierungen:

Aluminiummischkristall (α = Mischkristall) als Grundmasse mit binären, ternären und Mehrstoffaluminiden, dem Magnesiumsilizid Mg_2 Si und Silizium.

Metallide in den Legierungsgattungen:

Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mn:

kupferhaltige, eisensilizium; manganhaltige, binäre und Mehrstoffaluminide, Mg_2Si und Silizium.

Al-Cu-Ni

wie oben und nickelhaltige Aluminide.

Al-Mg-Si, Al-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mn:

eisen-, silizium-, mangan-, magnesiumhaltige Aluminide, Mg_2Si und Silizium.

Al-Si (Al-Si-Mg, Al-Si-Cu):

überwiegend Silizium, eisen-, silizium-, manganhaltige Aluminide, Mg_2Si, (kupferhaltiges Aluminid)

Lagerlegierungen:

Al-Fe

überwiegend eisenhaltige Aluminide

Al-Fe-Mn

überwiegend eisenhaltige und manganhaltige Aluminide.

Automatenlegierungen:

Metallide wie oben und Blei.

Gesamtanordnung:

Gusslegierungen:

Tannenbaumförmige, grössere Aluminiummischkristalle (α = Mischkristalle) mit den Aluminiden, ausserdem Mg_2Si und Silizium als binär-, ternär- oder quaternäreutektische, seltener peritektische Bestandteile und als Ausscheidungen. Gefügeausbildung im Sandguss gröber, im Kokillenguss feiner und besonders feinkörnig im Spritzguss und veredelten Silumin.

Press- und Walzlegierungen:

Gussgefüge zerstört, Metallide körnig und zeilig angeordnet (Metallidzeilen). Körnung des Aluminiummischkristalles der Grundmasse polygonal oder meist gestreckt. Oberfläche häufig mit kupferfreier Legierung plattiert.

Einzelausbildung:

Die Grundmasse enthält bei langsam gekühlten oder geglühten Legierungen kleinste Metallideinschlüsse als Ausscheidungen. In veredelten (vergüteten), Legierungen, auch im Zustand der Kaltaushärtung, ist die Grundmasse an Ausscheidungen verarmt.
Kaltgewalzt ist das Korn des Aluminiummischkristalles (α = Mischkristall) gestreckt und mit Gleitlinien durchsetzt.

b. Die Korrosion

Das Aluminium ist ein stark elektronegatives Metall. Es vermag Wasser unter Wasserstoffentwicklung stürmisch zu zersetzen, jedoch überzieht sich die Aluminiumoberfläche an der Luft und im Wasser sogleich mit einer dichtabschliessenden Haut aus Aluminiumoxyd. Diese hemmt die Korrosion so vollkommen, dass das Aluminium luft- und wasserbeständig ist und auch von vielen schwächeren organischen Säuren nicht angegriffen wird. Es ist daher ein geeigneter Werkstoff für Küchengeräte. Seine Korrosionsfestigkeit ist so gut, dass man das Eisen durch Plattierung mit Aluminium gegen Rost schützen könnte, falls solche Plattierung technisch

ausführbar war. Am beständigsten gegen Korrosionsangriffe ist Reinaluminium. Die heterogenen Gefügebestandteile der Legierungen vermindern die Korrosionsfestigkeit beträchtlich, insbesondere macht ein Kupfergehalt das Aluminium korrosionsanfällig, da das in den Aluminium-Kupfer-Legierungen enthaltene Metallid Al_2Cu gegenüber dem Aluminium elektropositiv ist. Deshalb verwendet man kupferfreie Aluminiumlegierungen, wenn es auf die Korrosionsfestigkeit ankommt, oder plattiert die kupferhaltigen Legierungen mit Reinaluminium.

c. Der Verschleiss

Genaue Werte über die Verschleissfestigkeit - mit Ausnahme von Lagerlegierungen - liegen nicht vor. Hohe Verschleissbeanspruchung lässt ungeschütztes Aluminium nicht zu. Es ist wesentlich weicher und abnutzbarer als Stahl, Messing und Kupferlegierungen.

d. Die Reibeigenschaften

Aluminium galt bis vor wenigen Jahren für ungeeignet zur Verwendung als Lagermetall. Neuerdings hat man gefunden, dass ein hoher Eisengehalt das Aluminium auch als Lagermetall geeignet macht. Man verwendet Prozentsätze bis zu 6% Eisen, während bekanntlich die Aluminiumknetlegierungen zur Vermeidung von Sprödigkeit und Korrosion möglichst eisenfrei sein sollen. Das Eisen, bei allen übrigen Aluminiumlegierungen mit Recht als Schädling angesehen, verleiht den Aluminium-Lager-Legierungen eine ausreichende Gleitfähigkeit. Nähere Angaben über die Bewährung der Aluminiumlegierungen als Lagermetall und ihre Eigenschaften bei Grenzreibungen und Verschleissreibung enthält Abschnitt "Lagermetalle", Unterabschnitt "Die Reibeigenschaften" auf Seite 57/58 59

Die Bearbeitbarkeit [47,48,49,50,51]

Aluminium ist bei geringem Kraftbedarf gut bearbeitbar mit lockigem Span. Ein Zusatz von Blei (Kadmium,

Wismut) macht den Span kurz und spritzig, so dass Legierungen von Aluminium mit diesen Metallen auch auf Automatenmaschinen für Bohr- und Drehteile verwendet werden können. Um die gute Bearbeitbarkeit voll auszunutzen, muss man mit grossen Drehzahlen und grossem Vorschub unter Verwendung kräftiger, starrer Werkzeugmaschinen mit schwingungsfreier Lagerung arbeiten. Auch müssen Sonderwerkzeuge mit geräumigen, geschliffenen Span-Nuten und geeigneten Keil- und Spanwinkeln angewandt werden. Bei solchem intensiven Arbeiten werden die Schneiden der Werkzeuge durch die harten Einlagerungen der Aluminiumlegierungen angegriffen. Man muss also beste Schnellarbeitsstähle und Werkzeuge mit Auflagen aus Hartmetall verwenden. Eingehende Angaben über die Form und Art der Schneidwerkzeuge enthält das Aluminium-Taschenbuch. [52]

2. Magnesiumlegierungen

a. Der Gefügeaufbau

Gefügebestandteile

Magnesiummischkristall (α = Mischkristall) als Grundmasse, Metallide Al_3Mg_4, $Al_2Mg_3Zn_3$, Mg_2Si, Mg_9Ce, Mangan, Eisen

Gesamtanordnung :

Gusslegierungen :

Tannenbaumförmige, primäre Magnesiummischkristalle (α= Mischkristall) mit den Metalliden als eutektischen Einlagerungen.

Knetlegierungen :

Gussgefüge zerstört, Metallide zeilig angeordnet (Metallidzeilen)

Einzelausbildung:

Die Grundmasse enthält streifige und körnige Metallidausscheidungen. Die Körnung wird bei den Mg-Mn-Legierungen durch Cer-Zusatz sehr fein. Eiseneinschlüsse als kleine Körner.

b. Magnesium kristallisiert hexagonal

Eisen, Kupfer und Aluminium kristallisieren regulär. Das Magnesium aber ist hexagonal. Diese anisotrope Kristallform bewirkt eine Anisotropie der Verformung bei der Reckung. Diese äussert sich nicht nur am Einkristall, sondern auch bei den aus vielen Kristallen aufgebauten Werkstücken. Deren einzelne Kristalle längen sich bei Beanspruchung zunächst verschieden, und erst bei erhöhter Dehnung beginnt eine gleichmässige Dehnung; während Aluminiumstäbe bereits von 0,01 % bleibender Dehnung an gleichmässig fliessen, ist die Längung von Magnesiumstäben ungleichmässig, bis die bleibende Dehnung etwa 0,1 % überschreitet. Die bei hohen einseitigen Reckgraden eintretende Gefügeregelung macht sich bei dem hexagonalen Magnesium stärker bemerkbar als an den regulären Metallen. Magnesium-Pressstücke zeigen deutliche Unterschiede ihrer zug- und druckelastischen Eigenschaften. Normal gepresste Elektronlegierungen haben bei Zugbeanspruchung eine Streckgrenze von 20 bis 22 kg/mm², während ihre Quetschgrenze schon bei 12 bis 14 kg/mm² liegt.

c. Das spezifische Gewicht

Das Magnesium hat von allen Konstruktionsmetallen das geringste spezifische Gewicht. Das spezifische Gewicht beträgt nur ≈ 1,7, gegenüber ≈ 2,7 bei Aluminium und ≈ 7,8 bei Eisen. Werkstücke aus Magnesium lassen sich noch bequem von Hand auf den Werkzeugmaschinen einspannen, während man gleichgrosse Stücke aus Stahl mit Kran [illegible] bewegen muss. Das geringe Gewicht des Magnesiums bei einer Festigkeit, die für manche Zwecke ausreicht, empfiehlt seine Anwendung für bewegte Konstruktionsteile, insbesondere in der Luftfahrt, im Schiffbau und Verkehrswesen, weil dadurch tote Last eingespart werden kann.

d. Die Bearbeitbarkeit

Bei Magnesium kann die höchste Schnittleistung unter allen metallischen Werkstoffen erzielt werden, da es die geringsten Schnittdrücke beansprucht. Die wirtschaftliche Ausnutzung dieses Vorzuges ist nur bei Massenherstellung möglich, Sie verlangt Werkzeugmaschinen hoher Leistungsfähigkeit und besondere Schneidwerkzeuge, ähnlich wie dies auch für Aluminium gilt (vgl. Abschnitt "Aluminiumlegierungen" Unterabschnitt "Die Bearbeitbarkeit" Seite 44 ~~52, 2.1.1.5.~~).

e. Die thermischen Eigenschaften

Bei gleicher Wärmezufuhr dehnt sich das Magnesium fast fünfmal so viel aus wie Eisen, vgl. Zahlentafel 3. Diese Verhältniszahl wird sich nicht voll auswirken, da die Wärmeableitung im Magnesium etwa viermal so schnell vor sich geht wie im Eisen. Aber auch bei gleicher Erwärmung ist die Ausdehnung des Magnesiums doppelt so gross wie die des Eisens. Konstruktionsteile aus Eisen und Magnesium, die einer Erwärmung ausgesetzt sind, (z.B. Lagerschalen) sollen daher nicht fest verbunden sein, dann würde das Magnesium gestaucht werden und eine Formänderung erleiden. Die Magnesiumteile sollen sich ungehindert vom Eisen ausdehnen und zusammenziehen können.

Zahlentafel 3

Thermische Eigenschaften und spez. Gewichte von Mg, Al und Fe.

		Mg	Al	Fe
1.	Spez. Gewicht g/cm³	1,74	2,70	7,86
2.	Spez. Wärme cal/g °C	0,24	0,22	0,115
3.	Isovolumetrische Erwärmung °C cal/g cm³	2,5	1,7	1,1
4.	Wärmefähigkeit °C cal/cm s	0,40	0,52	0,11
5.	Wärmeausdehnungszahl mm/m °C	0,025	0,024	0,012
6.	Wärmeausdehnung bei gleicher Wärmezufuhr cal mm/m	0,06	0,04	0,015

f. Reibeigenschaften

Über gleitende Reibung und Verschleiss des Magnesiums liegen noch wenig Messungen vor. Das im Abschnitt "Die Reibeigenschaften" Seite 49, für Aluminium Gesagte wird im wesentlichen auch für Magnesiumlegierungen gelten. Hochwertige Lagermetalle aus Magnesium als Hauptbestandteil sind bisher nicht bekannt geworden. Jedoch sind die Gleiteigenschaften bei gering belasteten Flächen, z.B. bei Zylinderbahnen, wie die Erfahrung gezeigt hat, ausreichend.

IV. Bronze, Messing und Rotguß

Bevor die Menschen gelernt hatten, Eisen herzustellen, waren Bronze und Rotguß die einzigen Gebrauchsmetalle. Die Funde aus jener uralten Bronzezeit vor etwa 3000 Jahren lassen jene Eigenschaften der Bronzen erkennen, die auch heute noch ihr wesentlicher Vorzug sind, nämlich ihre Korrosionsfestigkeit. Diese Bronzewaffen und -geräte aus vorgeschichtlichen Funden sind mit einer dichten Patina bedeckt, und viele haben ihren Metallkern bewahrt. Die um viele Jahrhunderte jüngeren Eisenwaffen und -geräte aus fürhgeschichtlichen Grabstellen sind fast alle längst völlig durchgerostet. Einige sind als Oxydkörper erhalten, die meisten aber sind gänzlich gelöst und fast spurlos vergangen. Nur wenige, die trocken ohne Luftzutritt lagerten, sind als Metall erhalten geblieben. Als bevorzugtes Metall wird auch heute Bronze im Schiffs- und Schiffsmaschinenbau angewendet, weil ungeschütztes Eisen in Seewasser und Seeluft schnell korrodiert. Auch wird Stahl für diese Verwendungszwecke mit Bronze oder Messing plattiert. Im allgemeinen Maschinenbau verwendet man Kupferlegierungen wegen ihrer guten Reibeigenschaften als Lagermetall. Wegen der guten Korrosionsbeständigkeit gebraucht man sie für Rohre und Armaturen an Wasser- und Ölleitungen und dergl.

Die Gefügebestandteile der Kupferlegierungen sind in Tafel 1 genannt. Über die Reibeigenschaften wird im Abschnitt "Lagermetalle", Seite 55 und folg. eingehend berichtet. Die Kupferlegierungen sind sehr gut bearbeitbar. Sie sind thermisch nicht härtbar, sondern nur durch Kaltreckung. Ihre Härte und Schneidhaltigkeit ist der des gehärteten Stahles durchaus unterlegen. Auch hinsichtlich Festigkeit und Streckgrenze kommen sie den vergüteten Sonderstählen nicht gleich. Hervorragend ist jedoch die Zähigkeit einiger Bronzen. Ebenso wie zäher Nickelstahl schnürt sich auch eine Maschinenbronze beim Zerreissversuch nicht nur an einer Stelle, sonder an vielen Stellen über die ganze Länge des Probestabes ein, bis sie endlich reisst.

V. Lagermetalle

1. Der Gefügeaufbau

Die Gefügebestandteile sind bereits in Tafel 1 aufgeführt. Über das Gefüge von Grauguss gibt der Abschnitt "Grauguß" Unterabschnitt "Der Gefügeaufbau", Seite 41/42, Auskunft. Im Abschnitt "Der Gefügeaufbau der Lagermetalle" ist bereits über das Gesamtgefüge berichtet.

a. Weißmetalle

Das Weißmetall umfasst den weiten Legierungsbereich von ca. 80 % Sn, 10 % Sb, 10 % Cu bis ca. 5 bis 10 % Sn, 15 % SB, 2 % Cu, 80 % Pb. Man verwendete vor dem Kriege Lagerweißmetalle mit Zinngehalten von etwa 10, 20, 40, 60, 70 und 80 % Sn. Das teuere Zinn war also in den verschiedensten Graden durch das billigere Blei ersetzt. Dabei hatte man zunächst die Meinung, dass die Güte der Weißmetalle etwa dem Zinngehalt proportional wäre. Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Meinung irrt. Das beste und alle anderen Weiß metallarten deutlich übertreffende Weißmetall ist die bleifrei, nur aus Zinn, Antimon und Kupfer bestehende

bestehende Legierung. Sobald mehr als ca. 0,2 % Blei zugegen ist, wird die Güte beträchtlich vermindert. Es macht für die Reib-Eigenschaften nicht viel Unterschied, ob ein Weißmetall 10 % oder 80 % Blei enthält. In den hochzinnhaltigen Legierungen ist das Blei als feine eutektoidische Einlagerung enthalten. Die kupfer- und antimonhaltige Zinngrundmasse ist wesentlich härter als Blei. Hier liegt dann der Fall vor, dass in einer härteren Grundmasse kleine weiche Einlagerungen eingebettet sind. Die Bleieinschlüsse hängen nicht zusammen, bilden also keine Ölnut. Sie befördern nicht die Schmierung, unterbrechen aber das auf dem Zinn haftende Epilamen an sehr vielen Stellen.

b. Zinnbronze und Rotguß

Die gegossenen Lagerschalen aus Bronze und Rotguß sind infolge der Kristallseigerung aus weicheren Achsstreifen der Kristalle und härteren Restfeldern aufgebaut. Diese Anordnung ergibt die für Lagermetall gewünschte Lagerbeschaffenheit. Bei homogenisierendem Glühen werden die Härteunterschiede zwischen den Achsstreifen und Restfeldern der Kristalle aufgehoben. Man soll also gegossene Bronze- und Rotguß-Lagerschalen ungeglüht verwenden.

c. Bleibronze

Tannenbaumkristalle bilden bei Bleibronze die härteren Einlagerungen, während die weichere Grundmasse aus Blei besteht. Ein Zusatz von etwas Zinn (1 bis 2 %) oder Antimon ist zur Erhöhung der Härte des Kupfers notwendig. Selbst kleine Eisen- und Schwefelgehalte gelten als schädlich. Grössere Bleianhäufungen ~~xxxxxxxx~~ müssen vermieden werden. Das Blei-Kupfer-Monotektikum hat in hohem Masse die Neigung, zu entarten. Es bildet also keineswegs das von der Theorie geforderte feinkörnige gleichmässige Gefüge, sondern das Kupfer und das Blei kristallisieren jedes für sich besonders in grösseren Partien. Die früher

zunächst angewandte monotektische Legierung mit etwa 35 % Blei hat sich wegen der grossen Bleiabsonderung als ungeeignet erwiesen. Man verwendet stark untermonotektische Legierungen mit 18 bis 20 % Blei. Bei diesem geringen Bleigehalt kann man durch geeignete Erstarrungsbedingungen die Bleiabsonderung vermieden werden. In Ermangelung anderer schnell ausführbarer Prüfungsweise geschieht die Abnahmeprüfung der Bleibronzeschalen auf Grund von Röntgenaufnahmen. Auf den Röntgenfilmen erscheint das Blei heller, das Kupfer dunkler. Ein Metall gilt also gut, wenn es die hellenund dunklen Stellen in ganz gleichmässiger feiner Verteilung zeigt. Dabei kann man aber kleine Hohlräume nicht sicher von Kupfereinschlüssen unterscheiden, und es ist nicht ausgemacht, ob die ganz feine gleichmässige Verteilung der Legierungsbestandteile für die Reibeigenschaften wirklich von ausschlaggebender Bedeutung ist.

d. <u>Sintermetalle</u>

In den letzten Jahren ist mit grossem Erfolge das ölgetränkte Sintereisen als Lagermetall eingeführt worden. Das Gefüge besteht nur aus homogenen Eisenkristallen, ist jedoch überall von Hohlräumen durchzogen. Diese Sinterhohlräume bilden eine zusammenhängende Äderung durch das ganze Metall. Da das Aderwerk mit Öl gefüllt ist und die Öltränkung im Betriebe nachgefüllt werden kann, so bildet sie eine nie versagende Schmierung. Das Öllamen auf der den Hauptanteil der Reibbahn bildenden Eisenfläche bleibt auch bei mangelhafter Wartung des Lagers erhalten.

2. <u>Die Reibeigenschaften</u>

Die folgende Beurteilung der Laufeigenschaften folgt wiederum den Versuchen und Auffassungen von H. Lüpfert. [22]

Die Grenzschmierlaufeigenschaften der Bronzen (Zinnbronze und Bleibronze) zeigen eine mittlere Höhe. Zinnbronze (G. Bz. 10) erträgt dabei eine Belastung von ca. 160 kg/cm^2, Bleibronze von ca. 200 kg/cm^2. Bei Verschleißreibungen ist Zinnbronze noch mit etwa 5/kg cm^2, Bleibronze sogar mit 10/kg cm^2 belastet. Die Bronzen gehören zu den Lagermetallen, bei denen der Verschleiss nicht plötzlich einsetzt, sondern bei denen sich das beginnende Versagen durch allmähliches Grösserwerden des Lagerspieles ankündigt, ohne stets sogleich zu völligem Unbrauchbarwerden des Lagers zu führen.

Gußeisen kommt hinsichtlich der Grenzreibung den Bronzen nicht ganz gleich, bei Verschleissreibung dagegen erreicht Perlitgußeisen sogar die Belastungswerte von Bleibronze.

Die Aluminiumlegierungen zeigen bei Grenzreibung die überraschend hohe Belastung von ca. 150 kg/cm^2, dagegen versagen sie bald bei Verschleissreibung. Sie sind also in Lagern mit mangelnder Schmierung nicht am Platze.

Das Weißmetall kommt bei Grenzschmierung den Bronzen fast gleich, bei Verschleissreibung übertrifft es mit einer Belastbarkeit von ca. 20 kg. alle übrigen bisher genannten Lagermetalle. Insbesondere ist das bleifreie Weißmetall bei Verschleissreibung sowohl dem Grauguß als auch denBronzen überlegen, während die hochbleihaltigen Weißmetalle plötzlich stark verschleissen, sobald ein Fressen begonnen hat.

Die ölhaltigen Sintermetalle dürfen bei Grenzreibung nicht über ca. 30 kg/cm^2 belastet werden, ertragen jedoch eine Verschleissreibung mit ebenfalls ca. 30 kg/cm^2 Belastung. Hinsichtlich des sogenanten Notlaufes, also bei versagender Ölzufuhr, sind demnach die ölhaltigen Sintermetalle allen übrigen Lagerwerkstoffen überlegen. Sie sind daher für die Anwendung

im Feinmaschinenbau mit seinen meist ungepflegten Lagern besonders geeignet. Für die Zwecke des mittleren Maschinenbauers sind die Laufeigenschaften von Weiß-metall, Bronze und Gußeisen ausreichend, während die Aluminiumlegierungen nur dann unbedenklich angewandt werden können, wenn für einwandfreie Schmierung stets sicher gesorgt werden kann.

Tabelle 1.

Gefügebestandteile einiger im Motorenbau angewandter Metalle:
(Stahl, Sonderstahl, Grauguß, Hartguß, Temperguß, Rotguß, Bronze, Verbundguß, Leichtmetalle, Weißmetalle)

Metall:	Grundmasse:	Einlagerung:
Kohlenstoff-Stahl:		
geschmiedet......	Ferrit, Korngestalt polyedrisch	Perlit
weichgeglüht.....	desgl.	körniger Zementit
gehärtet.........	Martensit	Einlagerungen fehlen im untereutektoidischen Stahl: Zementit und Austenit
vergütet.........	Ferrit, Korngestalt zackig	sehr feinkörniger Zementit
kalt gereckt.....	Ferrit, Körnung gestreckt	Perlit oder Zementit
Sonderstahl:		
geschmiedet	Ferrit	Karbitperlit, Troostit oder Sorbit, Hardenit
weichgeglüht.....	Ferrit	körniges Karbid
gehärtet.........	Martensit	Einlagerungen fehlen im untereutektoidischen Stahl. Im übereutektoidischen Stahl: Sonderkarbid, Austenit
vergütet.........	Ferrit	feinkörniges Sonderkarbide

- -

Metall:	Grundmasse	Einlagerung
Ledeburitische Sonderstähle:		
geschmiedet....	Ferrit	Sonderkarbide, Karbidperlit
weichgeglüht...	Ferrit	körnige Sonderkarbide
gehärtet.......	Martensit, Austenit	körnige Sonderkarbide
gehärtet und... angelassen		grössere Sonderkarbide, hochdisperse Ausscheidungen
Aushärtbare Sonderstähle:		
geglüht........	Ferrit	Karbidperlit
gehärtet und angelassen	Ferrit	Karbide, Fe_3Mo_2, Fe_3W_2, u.a.
Austentische Stähle:	Austenit	ohne und mit TiC, NbC, TaC
Grauguß:	Perlit mit oder ohne Ferrit	Graphit, Steadit, TiC, TiN u.a.
Hartguß:	Perlit	Karbid als Eutektikum
Temperguß:	Ferrit oder Perlit und Perlit	Temperkohle
Rotguß:	α-Kupfermischkristall	$Cu_{31}Sn_8$ (Bronzit), Blei

Metall:	Grundmasse:	Einlagerung:
Bronze:	α-Kupfermisch-kristall	ohne oder mit $Cu_{31}Sn_8$
Verbundguß Stahl:	Ferrit	Perlit
Bleibronze:	α-Kupfermisch-kristall	Blei
Leichtmetall: Aluminiumlegierung	α-Aluminiummisch-kristall	Aluminide mit Cu, Mn, Mg, Fe, Si, Ni. Mg_2Si, Si je nach Legierung
Elektron:	Magnesiummischkristall	Al_2Mg_3, Mn, Mg_2Si je nach Legierung
Weißmetall: hochbleihaltig	Bleimischkristall	Antimon, SbSn, Cu_2Sb, $CaPb_3$
hochzinnhaltige	Zinngrundmasse	SbSn, Cu_6Sn_5

Zahlentafel 2

Dauerstandfeste Legierungen und ihre Dauerstandfestigkeit bei verschiedenen Temperaturen.

Lfd. Nr.	Stahltyp	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	W %	Ti %	Nb %		Gefügezustand	Streckgrenze bei 20° kg/mm²	Zugfestigkeit kg/mm²	Grenzen des Streubereiches der Dauerstandfestigkeit nach DVM-Verfahren A/117/118: 400° kg/mm²	500° kg/mm²	600° kg/mm²	700° kg/mm²	800° kg/mm²	Verwendungszweck	Lfd. Nr.
1.	C-(Mn-)Stahl	0,1/0,5	0,1/0,3	0,5(bis 1)	-	-	-	-	-	-	-	-	Normalisiert(vergütet)	22/30	40/70	10/25	4/12	-	-	-	Kesselbau	1.
2.	Mn-Si-Stahl	0,15	0,5	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	"	> 30	47/56	19/25	6/10	-	-	-	Kesselbau	2.
3.	Mo-Stahl	0,1/0,15	0,2/0,4	0,6/0,8	-	-	0,3/0,4	-	-	-	-	-	"	26/30	45/55	≈ 20	12/18	-	-	-	Kesselbau	3.
4.	Cr-Mo-(Si-)Stahl	0,10/0,15	0,4/1,0	0,5	0,6/1,2	-	0,4/0,5	-	-	-	-	-	Vergütet	> 30	45/60	21/32	16/32	3/5	-	-	wasserstoffbeständige Apparate	4.
5.	Cr-V-Stahl	0,10	0,2/0,4	0,3/0,4	3	-	-	> 0,1	-	-	-	-	"	> 30	50/60	-	11/14	-	-	-		5.
6.	Cr-V-Stahl	0,15/0,20	0,2/0,4	0,3/0,5	1,5	-	-	0,15/0,30	-	-	-	-	"	> 35	50/70	21/32	12/18	3,5/4	-	-	Kesselbau	6.
7.	Cr-V-Stahl	0,2/0,5	0,2/1,0	0,3/0,5	1,5	-	-	0,4/1,2	-	-	-	-	"	> 35	80/90	40/50	22/28	4/6	-	-	Kesselbau	7.
8.	Cr-Mo-V-Stahl	0,15	0,2/1,0	0,3/0,5	1,3	-	0,2/0,35	0,18	-	-	-	-	"	> 38	50/80	21/32	15/20	3/3	-	-	Hochdruckkesselbau	8.
9.	Cr-Mo-V-Stahl	< 0,08	1,4/1,6	0,4/0,5	2,0/2,3	-	0,25/0,35	0,15/0,20	-	-	-	-	"	≈ 27	45/52	-	≈ 12	3/3	-	-	Hochdruckkesselbau	9.
10.	Cr-Ni-Mo-Stahl	0,10	0,5	0,5	0,8	1,5	0,3/1,0	-	-	-	-	-	"	> 60	80/90	50/60	29/45	5/5	-	-		10.
11.	Cr-Mo-V-Stahl	0,18/0,20	0,5	0,5	1,5	-	0,4/0,5	0,4/0,5	-	-	-	-	"	> 60	80/90	45/55	30/45	10/12	-	-	Hochdruckkesselbau	11.
12.		0,15/0,30	0,5	0,5	1,5	-	1,2	0,1/0,7	-	-	-	-	"	> 60	80/90	45/60	28/50	7/15	-	-	Hochdruckkesselbau	12.
13.	Cr-Mo-V-W-Stahl	0,20	0,5	0,5	3	-	0,4	0,8	0,5	-	-	-	"	75	≈ 100	54	36/45	15/18	-	-	wasserstoffbeständige Apparate	13.
14.		0,15/0,20	0,15/0,30	0,30/0,40	> 2,5	-	< 0,30	0,05/0,10	< 0,50	-	-	-	"	45	60/70	-	13/25	3,0/4,7	-	-	wasserstoffbeständige Apparate	14.
15.	Cr-Mo-V-Stahl	0,17/0,22	0,15/0,30	0,30/0,40	2,5/3,0	-	0,50/0,60	0,35/0,40	-	-	-	-	"	62	90	-	≈ 56	-	-	-	wasserstoffbeständige Apparate	15.
16.	6% Cr-(Mo, Si, Al, V-) Stahl	0,10	0,5/2,2	0,5	6	-	(0,5)	(0,1/0,3)	-	-	-	Al 0,5/1,8	"	30/40	50/70	-	7/10	2/4	0,5/0,8	0,1	Wasserstoffbeständige Apparate, Druckhülsen	16.
17.		0,10	0,5/2,2	0,5	6	-	(0,5/1,0)	-	-	0,3/0,5	0,5/0,8	-	geglüht	30/40	50/65	-	12/18	4/6	0,8	-	hitzebeständige Apparate	17.
18.	Rostbeständiger 13/17% Cr-Stahl	0,05/0,20	0,3	0,5	13/17	-	-	-	-	-	-	-	vergütet oder geglüht	> 35	55/65	30/34	10/20	2/4	0,3/0,8	-	Dampfturbinenschaufeln	18.
19.	13/17% Cr-Mo-Stahl	0,05/0,20	0,3	0,5	13/17	-	0,5/2,0	-	-	-	-	-	ferritisch-karbidisch	40/60	60/80	40/45	17/33	5/7	0,8/2,0	-	Dampfturbinenschaufeln	19.
20.	Hitzebeständiger Cr-Si-(Al-)Stahl	0,05/0,20	0,5/2,5	0,5	10/30	-	-	-	-	-	-	Al 0,5/5,0	ferritisch-karbidisch	35/45	50/70	-	7/25	2/4	0,8/2,0	0,3/1	hitzebeständige Apparateteile, Heizleiter	20.
21.	18/8 Cr-Ni-Stahl	< 0,10	0,5/2,2	0,5	18	8	-	-	-	0,2/0,5	-	-	Austenitisch	27	60/75	-	≈ 18	12/15	4/8	-	Hitzebeständige Apparateteile	21.
22.	Hitzebeständiger Cr-Ni-(Si, Ti-)Stahl	0,10/0,15	0,5/2,5	0,5	15/25	14/36	-	-	-	0,1/0,5	-	-	"	25/35	60/75	-	≈ 18	10/17	5/8	2/5	hitzebeständige Apparateteile, Heizleiter	22.
23.	Cr-Ni-W-Ti-Stahl	0,10	0,5	0,5	18	[illegible]	-	-	0,8	0,5	-	-	"	≈ 50	≈ 80	-	25/41	13/21	-	-	Turbinenteile	23.
24.	Cr-Ni-W-Nb-Stahl	0,10	0,5	0,5	18	[illegible]	-	-	0,8	-	1,0/1,5	-	"	≈ 50	≈ 90	-	40/41	18/30	≈ 6	-	Turbinenteile	24.
25.	Cr-Ni-W-Stahl	0,5/1,0	1,8	0,5	15	[illegible]	-	-	-	≈ 2	-	-	"	45/55	85/95	-	36/37	14/20	5/9	3/5	Turbinenteile, Auslassventile	25.
26.	Cr-Ni-(Fe-)Leg.	0,10/0,15	0,5/1,0	0,5/1,0	15/18	35/70	-	-	-	-	-	-	"	> 27	60/70	-	≈ 24	9/10	6/8	2/4	hitzebeständige Zwecke, Heizleiter	26.
27.	Cr-Ni-Fe-Mo(-W)-Leg.	0,10	0,5/1,0	0,5/1,0	15	[illegible]	7	-	(7)	-	-	-	"	> 30	65/80	-	≈ 26	14/15	10	-	hitzebeständige Zwecke, Abgasturbinen	27.
28.	Cr-Ni-Ta-Leg.	0,1/0,5	0,5/1,5	0,3/1,0	15/25	[illegible]	-	-	-	1,5/3,0	-	-	"	45/55	75/100	-	-	35/45	18/24	4/6	Abgasturbinen	28.
29.	Cr-Ni-Co-Ti-Leg.	0,10	0,5	0,5	10/20	[illegible]	-	-	-	≈ 2	-	20/25	"	30/48	75/100	-	-	30/40	10/20	4/5	Abgasturbinen	29.
30.	Cr-Ni-Co-W-Mo-Stahl	0,10	0,5	0,5	10/20	[illegible]	4/6	(1)	4/6	(2)	(1,5) Co	20/25	"	45	90	-	-	27/40	10/20	4/7	Abgasturbinen	30.
31.	Cr-Mn-Si-Stahl	0,10	1,5/4,0	8/20	8/18	0/2	-	-	-	(0,5)	-	-	"	25/38	70/90	-	≈ 17	12/17	6/11	2/4	Hitzebeständige Apparateteile	31.
32.	Cr-Mn-(Ni-)W-(Mo-) Stahl	0,5/1,0	1,0/2,0	6/15	10/18	0/6	(1/2)	-	1/4	-	-	-	"	60/70	80/95	-	-	16/18	5	2/4	Hitzebeständige Apparateteile	32.

Schrifttumsverzeichnis

zum Bericht Nr. 312, them. Kennziffer IV/-a

"Über die Beziehungen zwischen der Beschafferheit der Oberfläche von Kostruktionsteilen eines Motors und dem Verhalten im Betriebe."

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. H. Hanemann u.
Dr.-Ing. A. Schrader.

---

[1] M. Fink: Neue Ergebnisse auf dem Gebiete der Verschleißforderung. Diss. Techn. Hochschule Berlin 1929.
Ders.: Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens Heft 20 vom 15. Oktober 1929.

[2] M. Fink und U. Hofmann:
Z. anorgan. Chemie Bd. 210 (1933) S. 100/04.

[3] M. Fink und U. Hofmann:
Z. Metallkde. Bd. 24 (1932) S. 50/54.

[4] M. Fink und U. Hofmann:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 6 (1932/33) S. 161/64.

[5] H. J. Wiester:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd.9 (1936) S. 525/27.

[6] B.P. Haigh und B. Jones:
J. Inst. Met. Bd. 43 (1930 I) S. 271.

[7] E. Siebel und G. Stähli:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 15 (1941/42) S. 519/27.

[8] R. Glocker:
Schr. Dtsch. Akad. Luftfahrtforsch. Nr. 52 (1942/43) S. 1/14.

[9] H. Hanemann und F. Schulz:
Z. Metallk. Bd. 33 (1941) S. 124/34.

[10] N. A. Shishakow und V. J. Kasatochkin:
C. R. (Doklady) Acad. Sci. U.R.SS. Bd. 20 (1938) S. 277 (N.S.6).

[11] H. Hanemann und A. Schrader:
Atlas Metallographicus III. Berlin 1941, Gebr. Borntträger, S. 58/59

[12] W. Ruttmann:
Techn. Mitt. Krupp Bd. 4 (1936) S. 89.

[13] H. Möller und A. Rott:
Mitt. K. W.-Inst. Eisenforschg. Bd. 19 (1937) S. 61/63.

[14] G. Thomassen und D. M. Mc. Cutcheon:
Mech. Engng. Bd. 56 (1934) S. 155/57.

[15] A. Thum und F. Debus:
Mitt. Mat.-Prüf.-Anst. T. H. Darmstadt Heft 7.
Berlin 1936, VDI-Verlag.

[16] H. Wiegand:
Diss. T. H. Darmstadt 1933.

[17] W. Staedel:
Mitt. Mat.-Prüf.-Anst. T. H. Darmstadt Heft 4.
Berlin 1933, VDI-Verlag

[18] F. Rapatz:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30) S. 717.

[19] E. Brödner, Herstellung und Werkstatt,
Berlin 1934, VDI-Verlag.

[20] G. Schmaltz, Technische Oberflächenkunde,
Berlin 1936, Springer-Verlag

[21] Hans Moll: Superfinish - Feinziehschleifen,
Schleif- u. Poliertechnik Bd. 18 (1941) S. 210.

[22] H. Lüpfert: Die Notlaufeigenschaften der Gleitlagermetalle an Maschinen der Feinmechanik.
VDI-Forschungsh. 417, Berlin 1942, VDI-Verlag.
Auszug in Z. VDI Bd. 87 (1943) S. 266.

[23] E. H. Kadmer: Schmierstoffe und Maschinenschmierung,
2. Aufl. Berlin 1941, Gebr. Borntraeger.

[24] Beech, Gierens und Smith: On Mechanism of Boundary Lubrication. Proc. roy. Soc. Lond. Bd. 177 (1940)
S. 90/117.

[25] K.L. Wolf: Molekulare Physikalische Probleme in der Schmierung. Chem. Z. Die Chemie Bd. 55 (1942)
S. 295/98.

[26] H. Dosandt: Über den Stand unserer Kenntnisse in der Frage der Grenzschmierung.
Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 821/24

[27] H. Hanemann und A. Schrader:
Atlas Metallographicus Band I, Berlin 1933, Gebr.
Borntraeger.

[28] O. Heckler und H. Hanemann:
Z. Metallkde. Bd. 30 (1938) S. 410/16.

[29] H. Diergarten:
Metallwirtschaft Bd. 17 (1938) S. 1328/38.
Ders.: Gefügerichtreihen im Dienste der Werkstoffprüfung. Berlin 1940, VDI-Verlag.

[30] F. Rapatz:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30) S. 717

[31] H. Hanemann und A. Schrader:
Atlas Metallographicus Bd.II. Berlin 1936, Gebr.
Borntraeger.

[32] A. Diefenthäl und X Sipp:
Stahl und Eisen Bd. 40 (1920) S. 1141.

[33] H. Schmaltz
Diss. T.H. Aachen 193?.

[34] R. Kühnel:
Giesserei Bd. 1? (1924) S. 211, 493, 503, 573.

[35] R. Kühnel:
Stahl und Eisen Bd. 45 (1925) S. 1461.

[36] D.R.P. 301 913 v. 10.5.1916,
D.R.P. 325 250 v. 16.10.1918.

[37] ... Reininger:
Automobiltechn. Z. Bd. 37 (1934) S. 441/53.

[38] A. Wallichs und H. Dübringhaus:
Giesserei Bd. 17 (1930) S. 1169/77 und S. 1197/201.

[39] A. Wallichs und J. Gregor:
Giesserei Bd. 20 (1933) S. 517 und 548.

[40] F. Heimes und E. Piwowarsky:
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 6 (1932/33 S. 501.

[41] E. Scharschenberg:
Giesserei Bd. 19 (1932) S. 145.

[42] O. Bauer:
Gas-und Wasserfach Bd. 68 (1925) S. 704.

[43] A. Thiel und ... :
Korrosion und Metallschutz Bd. 4 (1928) S. 148.

[44] Iron Age Bd. ... (1935) Nr. 11 D. 10.

[45] E. Piwowarsky: Hochwertige Gußeisen,
Berlin, 1942, Springerverlag, S. 649.

[46] M. Hanemann und A. Schrader:
Atlas Metallographicus Bd. III, 1. Berlin 19..,
Gebr. Borntraeger.

[47] Herrmann Zurbrügg:
Die Bearbeitung des Aluminiums.
Leipzig 1935, ... Verlagsgs.

[48] F. Külpmann: Zum Schleifen und Polieren von Leichtmetall, Oberflächentechnik Bd. 18 (1941) S. 156.

[49] Paul Feldmann: Handbuch des Schleifers,
3. Aufl. Leipzig 1942, Jänicke.

[50] Herwart Opitz und Wilhelm Zimmermann:
Die Zerspanbarkeit der Automaten-Leichtmetalllegierungen Z. Metallk. Bd. 29 (1937) S.296/300.

[51] H. Schallbroch, R. Wallichs und H. Bethmann: Einfluss der Schneidflüssigkeit auf die Zerspanung von Leichtmetallen.
Z. Metallk. Bd. 29 (1937) S. 301.

[52] Aluminium-Taschenbuch, herausgegeb. von M. Haas, 9. Aufl. Berlin 1942, Verlag der Aluminium-Zentrale G.m.b.H., S. 258 u.f.

[illegible]

Abb. 1: Innere Spannungen in der Grenzschicht gedrehter Körper nach W. Ruttmann: Technische Mitt. Krupp Bd. 4 (1936) S.89, Masch.-Bau Betrieb Bd.15 (1936) S.557.

1: Bearbeitung: "Schnell" gedreht ohne Kühlung
2: Bearbeitung: "Langsam" gedreht mit Kühlung
3: Bearbeitung: "Schnell" gedreht mit Kühlung
x: Tiefe der Randzone
y: Spannungen

[illegible] 8

Eigenschaften von Stahl I und II

	%	Stahl I	Stahl II
C	"	0,15	0,30
Si	"	0,51	0,21
Mn	"	0,39	0,52
P	"	0,018	0,010
S	"	0,025	0,010
Ni	"	9,0	4,36
Cr	"	18,3	1,11
W	"	----	0,74

		Stahl I	Stahl II
Wärmebehandlung		1/4 h 1050 °C Luft	1/4 h 850 °C Luft
Streckgrenze	kg/mm^2	31	99
Zugfestigkeit	kg/mm^2	64	111
Dehnung	%	59	18
Einschnürung	%	69	64

Abb.2: Kraftfluss in Schrauben

1. Stiftschraube (Nach E.Wiegand: Diss.T.H.Darmstadt 1933)
2. Schraube mir normaler 0,8 d hoher Mutter (Nach Staedel: Mittlg.Materialprüfanstalt, T.H.Darmstadt, Heft 4(1933) u. E.Wiegand: Diss. T.H. Darmstadt 1933)
3. Schraube mit gekerbter 0,8 d hohen Mutter, Kerbtiefe 0,4 d (Nach E.Wiegand: Diss.T.H.Darmstadt 1933)

Unterschriften zu Abbildungen 1 bis 8

Abb. 3: Die Zerspanbarkeit des Gusseisens im Vergleich zu Stahl und Stahlguss. Einfluss des Einstellwinkels (30° und 45° nach Wallichs und Dabringhaus).
y: Schnittgeschwindigkeit in m/min.
x: Zugfestigkeit kg/mm²
1. Gusseisen; 2. Stahl und Stahlguss
Spantiefe t = 4 mm; Vorschub s = 1 mm/U
Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.385, Abb.489

Abb. 4: Schnittgeschwindigkeit in m/min. beim Zerspanen von Gusseisen im Vergleich zu Stahl und Stahlguss.
y: Schnittgeschwindigkeit in m/min.
x: Brinellhärte Hn, kg/mm²
1. Gusseisen, 2. Stahl und Stahlguss, 3. Schleuderguss
- Einstellwinkel 45°
Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.385, Abb.490

Abb. 6: Beziehungen zwischen Härte und gleitendem Verschleiss bei Gusseisen mit 3,26% C und 2,64% Si (nach E.Söhnchen u.E.Piwowarski)
y: Verschleiss in g/cm² während 5 00 Um
x: Brinellhärte Hn = H 10/3000/30 (10 mm Kugel-Dmr, 3000 kg, 30 s) kg/mm²
Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.400, Abb.515

Abb.7 : Beziehungen zwischen Abnutzung und Gehalt an gebundenem Kohlenstoff (nach A.L.Boegehold)

y : Verschleiss bei gleitender Reibung nach 24 h in g

x: gebundener Kohlenstoff %

Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.401, Abb.519.

Abb.5 : Zusammenhang zwischen Abnutzung und Graphitverteilung (linearer Graphitdurchsetzung) nach A.Wallichs und J.Gregor.

y : Verschleiss mg nach 5000 U

x : lineare Graphitdurchsetzung, ausgezählt je mm eines Hilfslinionnetzes

Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.403, Abb.523a.

Abb.8 : Einfluss des Phosphors auf den Verschleiss von Gusseisen. Methode nach Spindel (nach Klingenstein).

y: Verschleiss in mm

x: Phosphorgehalt in %

Aus E.Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S.404, Abb.524.

Lanemann

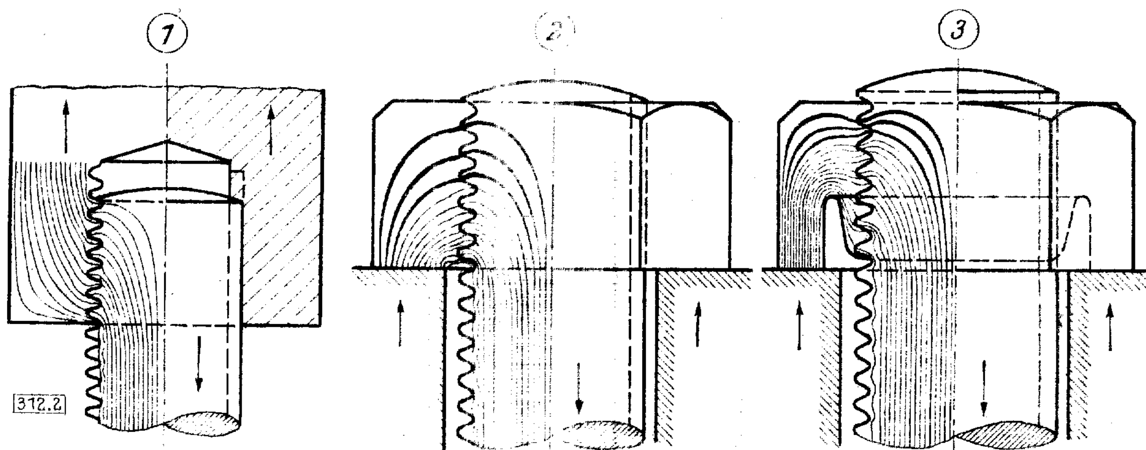


Abb. 2 Рис. 2

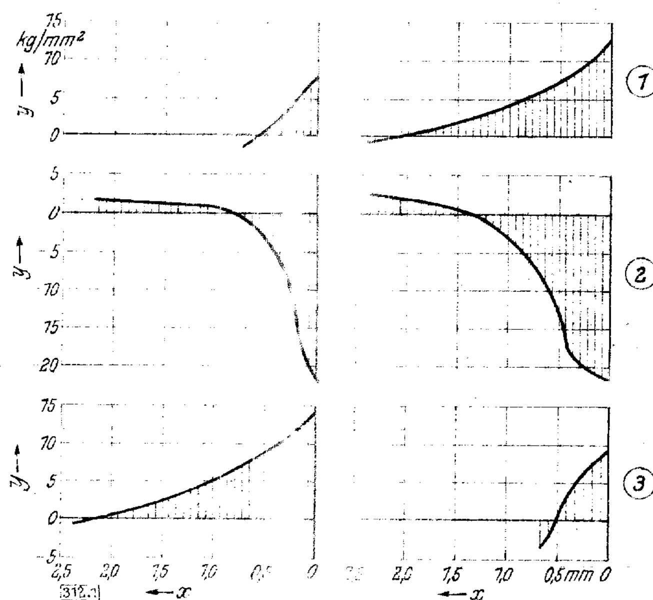


Abb. 1 Рис. 1

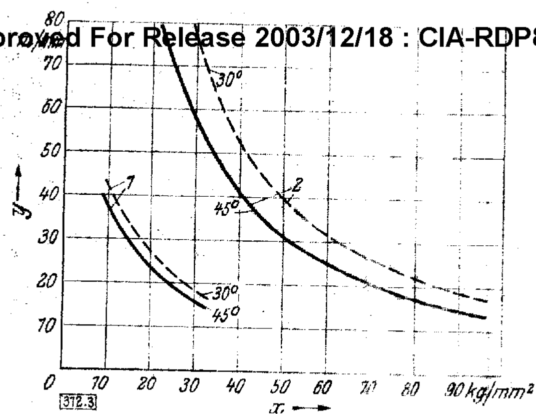


Abb. 3 Рис. 3

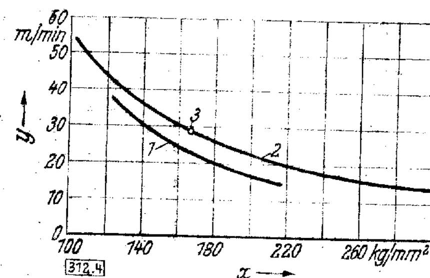


Abb. 4 Рис. 4

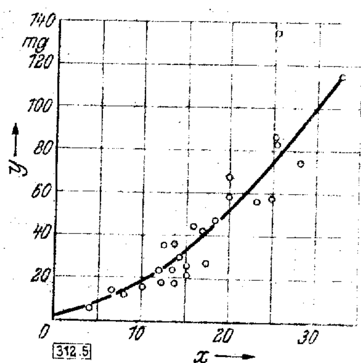


Abb. 5 Рис. 5

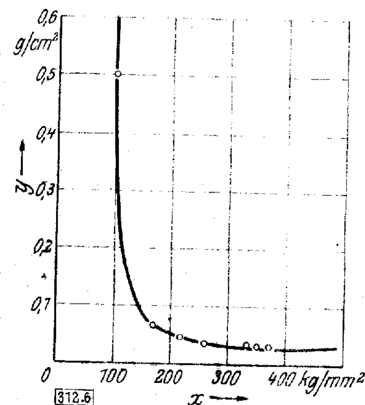


Abb. 6 Рис. 6

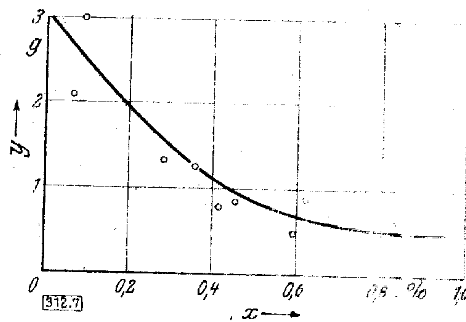


Abb. 7 Рис. 7

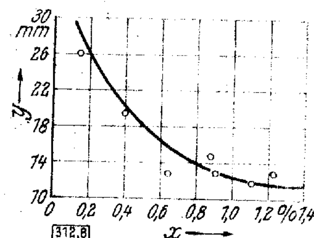


Abb. 8 Рис. 8

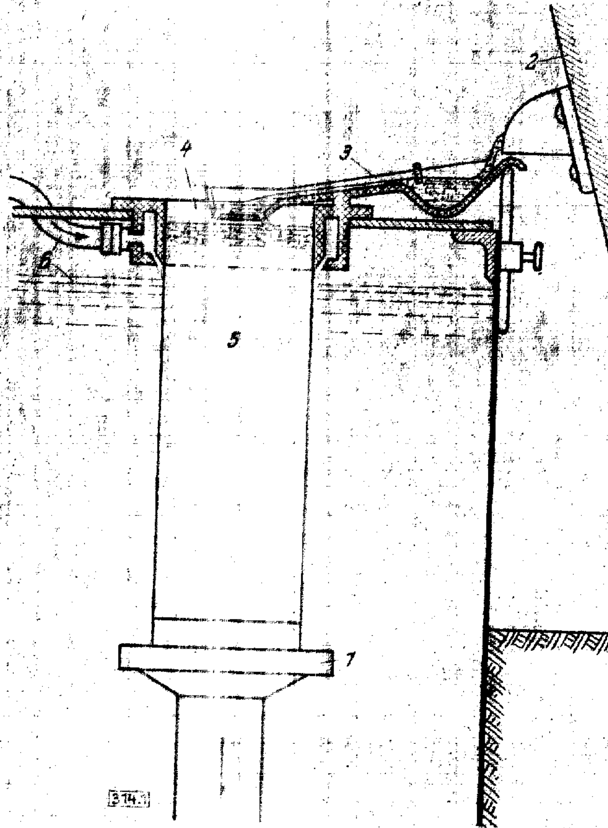


Abb.1 Рис.1

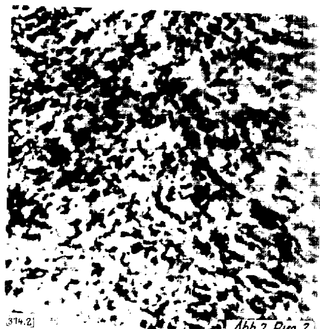


Abb.2 Рис.2



Abb.3 Рис.3



Abb.4 Рис.4

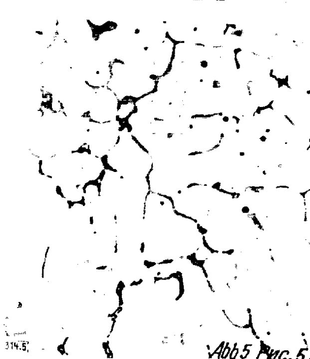
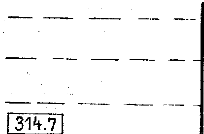


Abb5 Рис.5



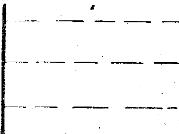
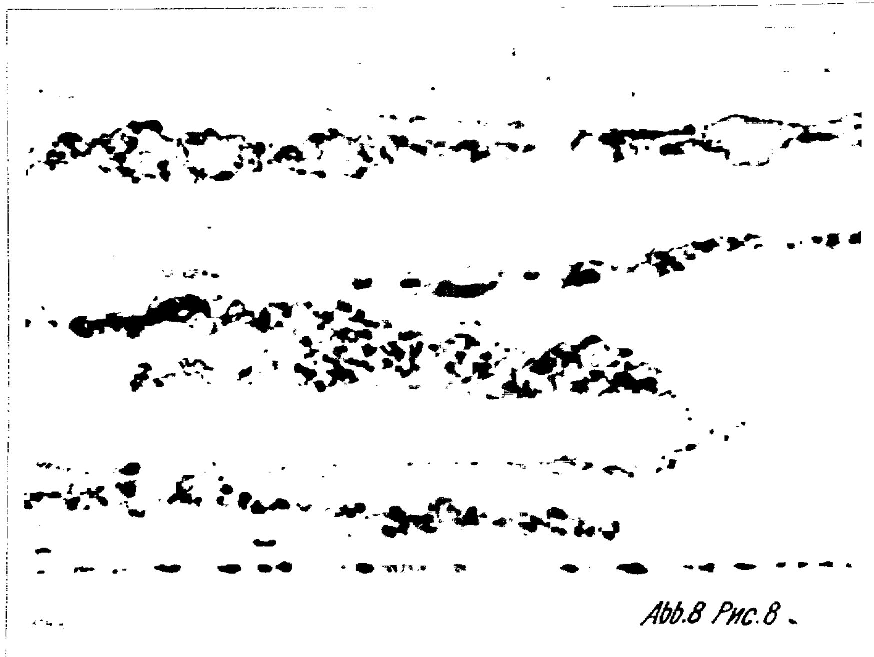


Abb.7 Рис.7


Abb.8 Рис.8.

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

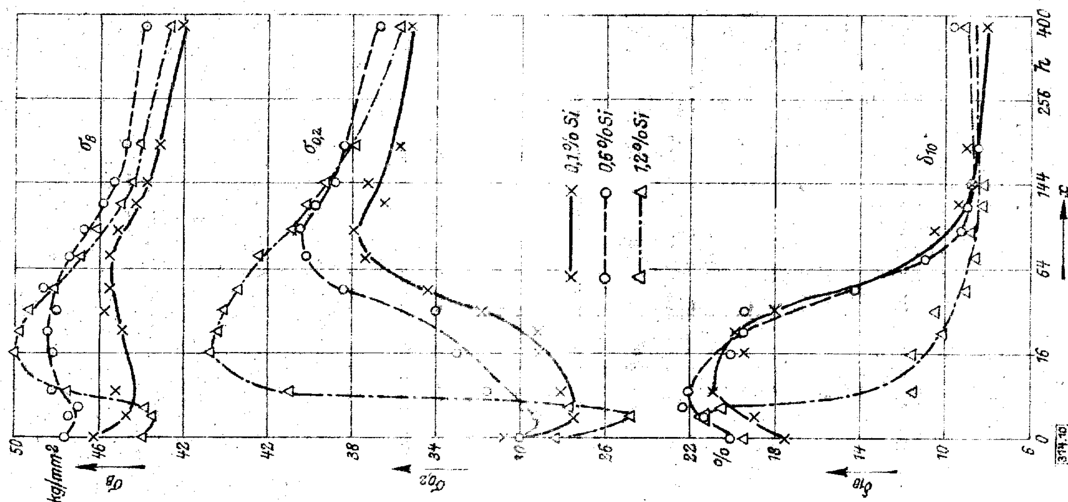


Abb.10 Рис.10

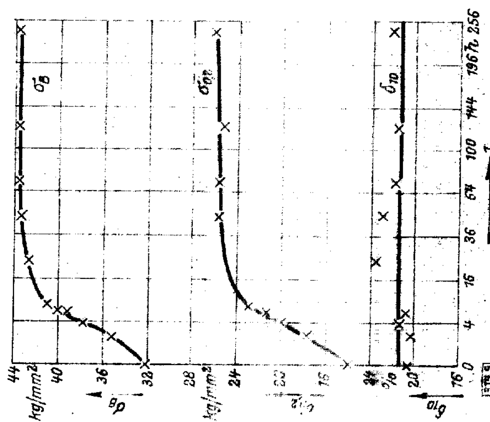


Abb.9 Рис.9

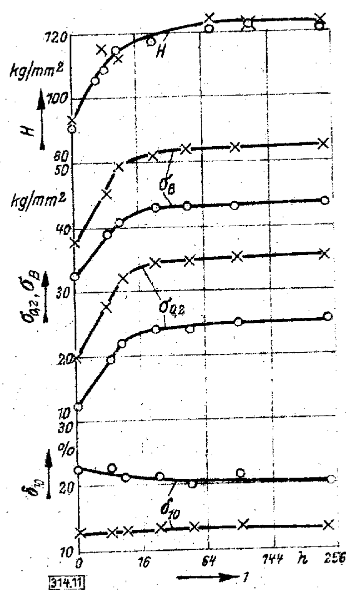


Abb.11 Рис.11

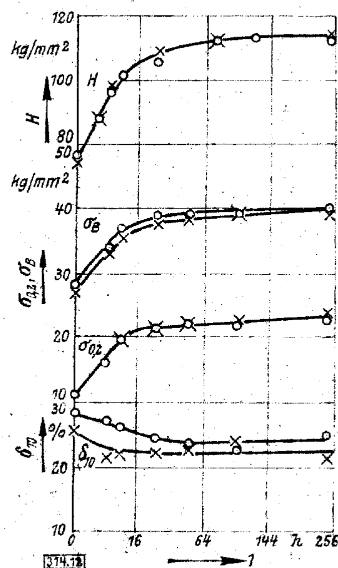


Abb.12 Рис.12

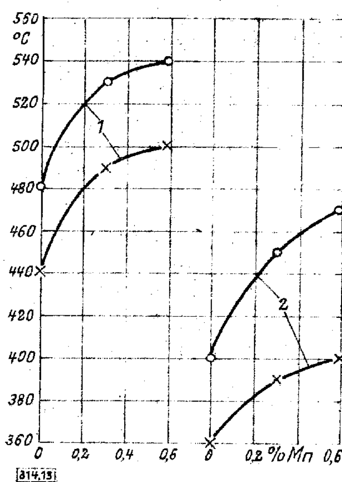


Abb.13 Рис.13

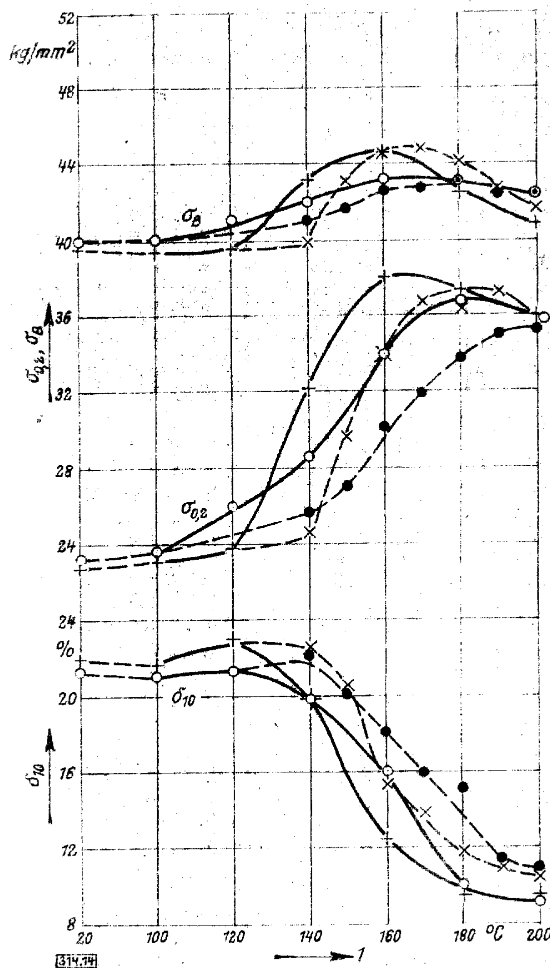


Abb.14 Рис.14

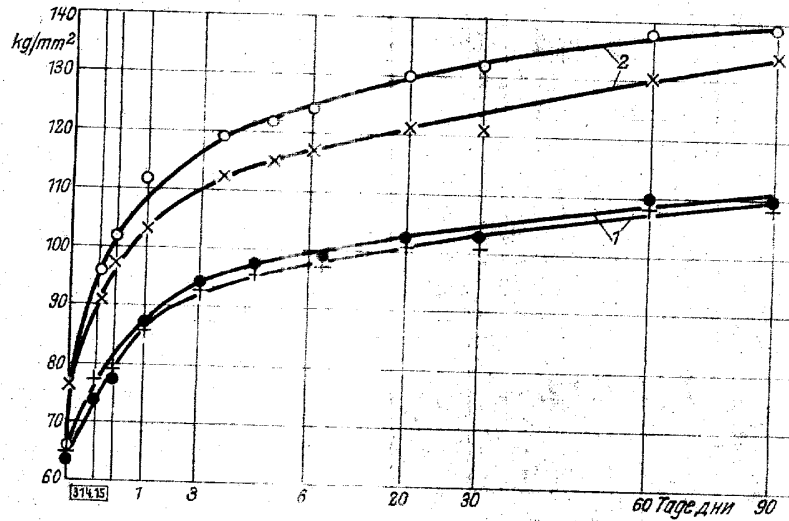
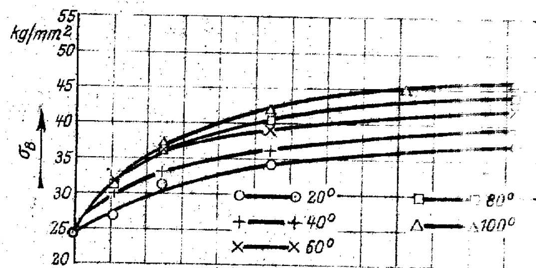
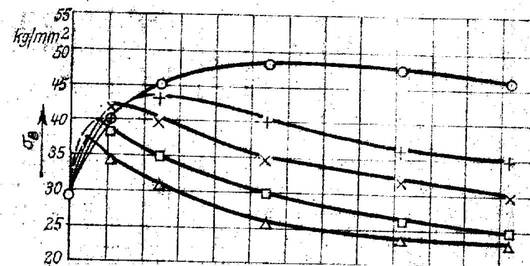
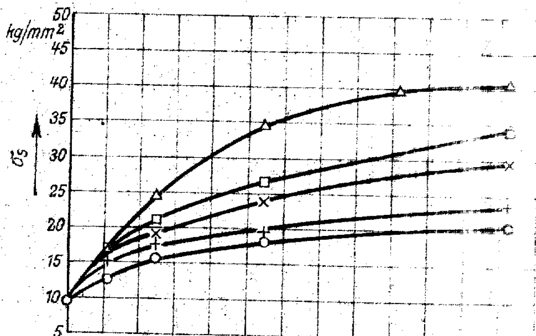
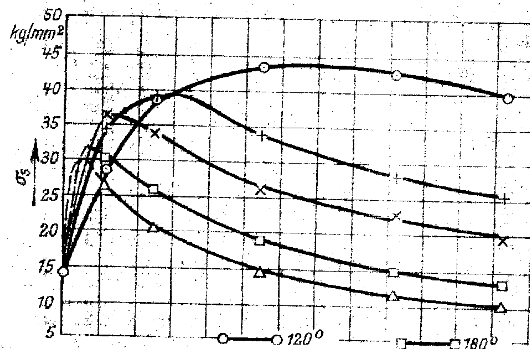


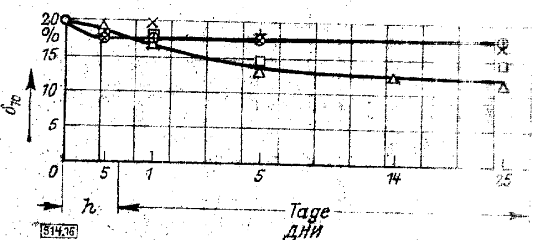
Abb. 15 Рис. 15











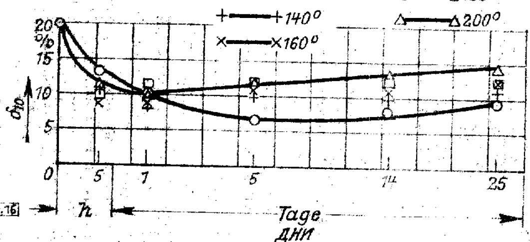
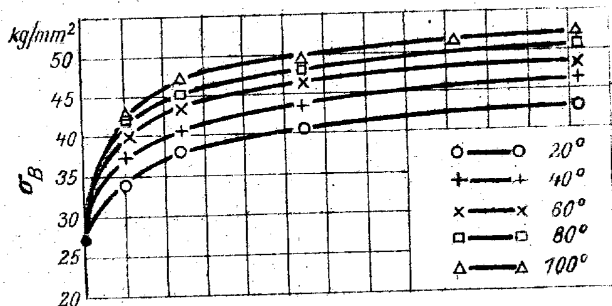
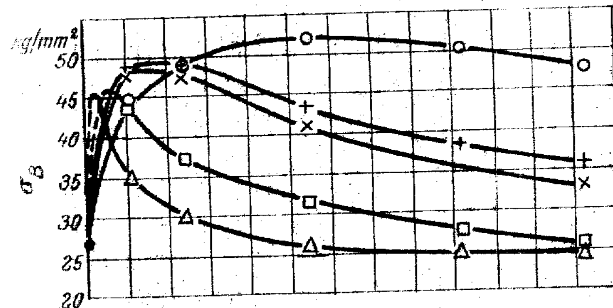
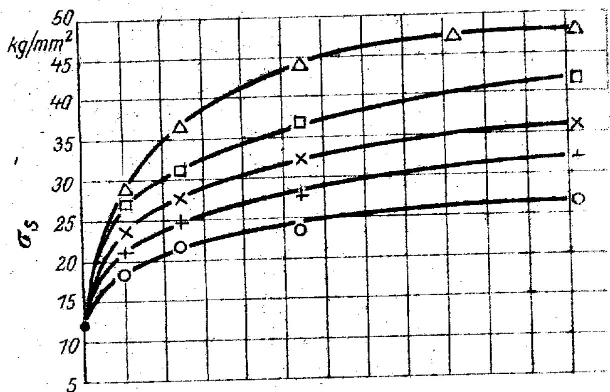


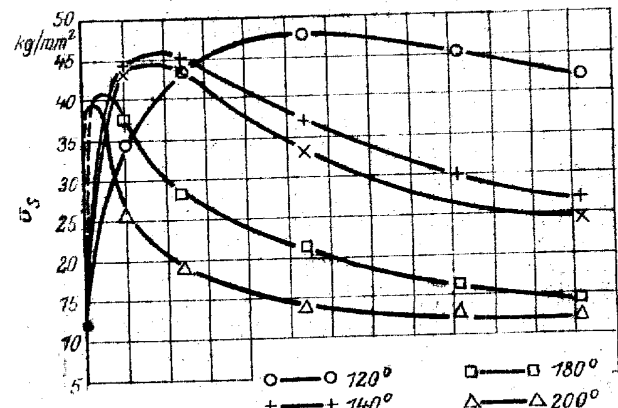
Abb. 16 Рис. 16

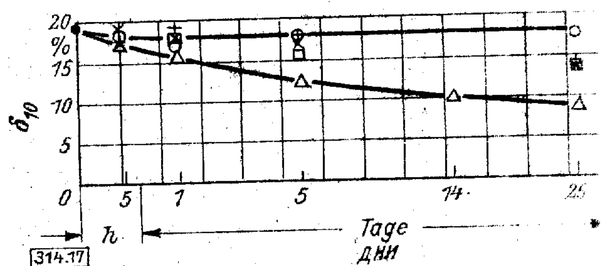
Gebr. Wichmann, Berlin NW 7, Marienstraße 19-20











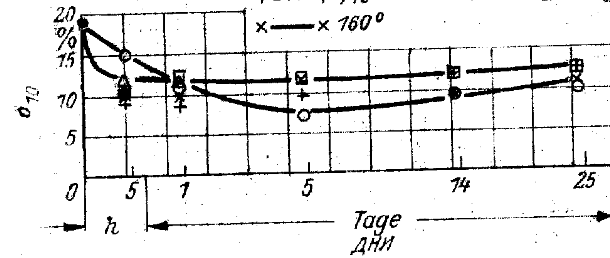
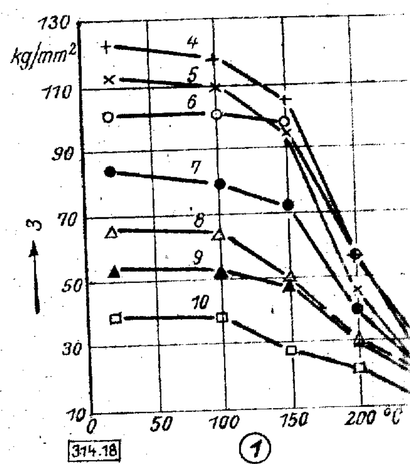


Abb. 17 Рис. 17



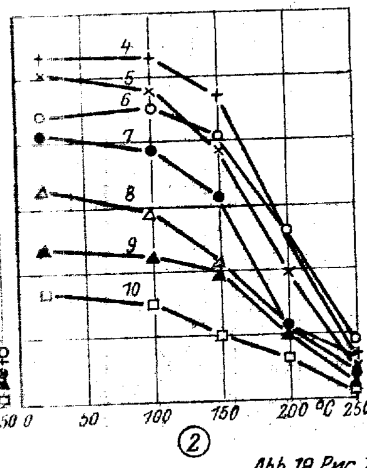


Abb. 18 Рис. 18

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

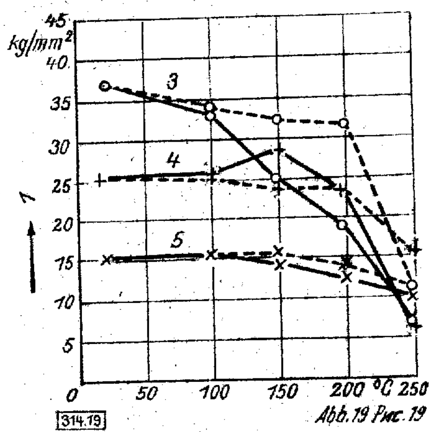


Abb.19 Рис.19

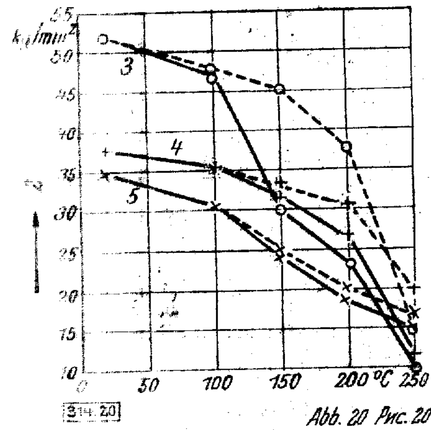


Abb. 20 Рис. 20

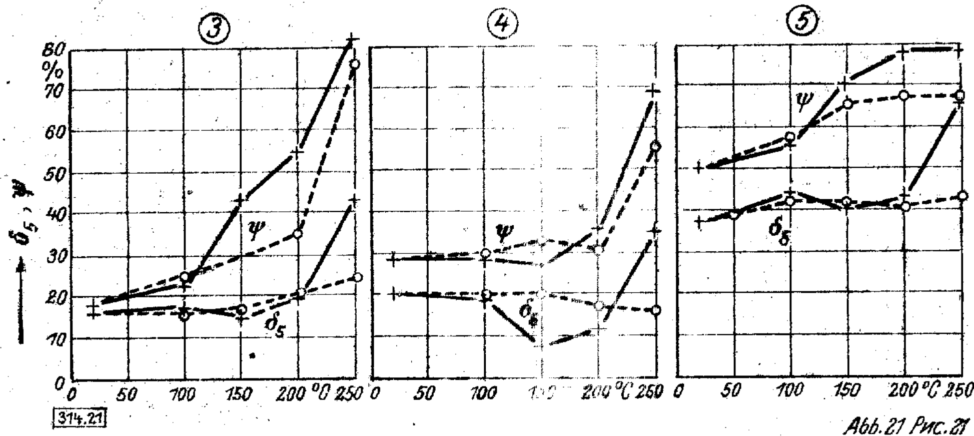


Abb.21 Рис.21

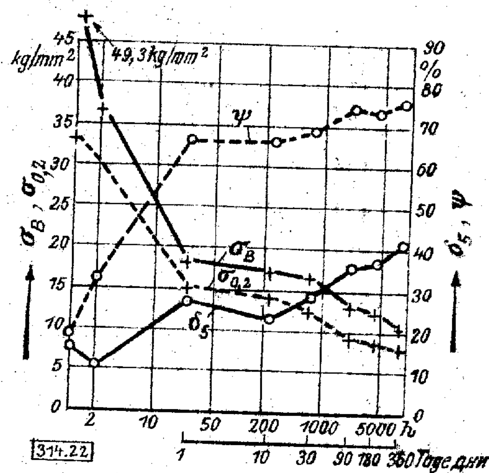


Abb.22 Рис. 22

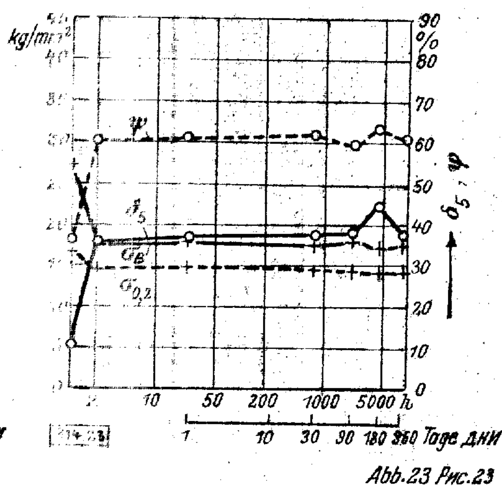


Abb.23 Рис.23

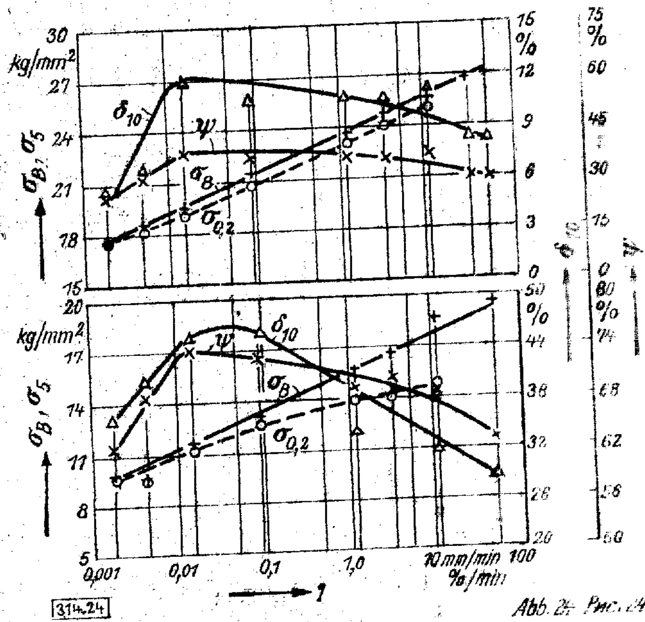


Abb. 24 Рис. 24

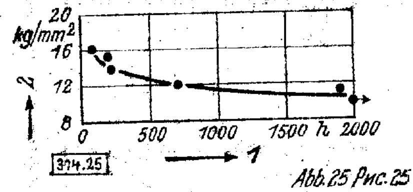


Abb. 25 Рис. 25

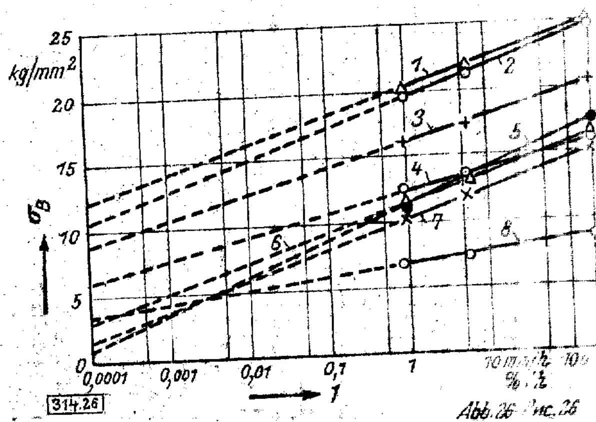


Abb. 26 Рис. 26

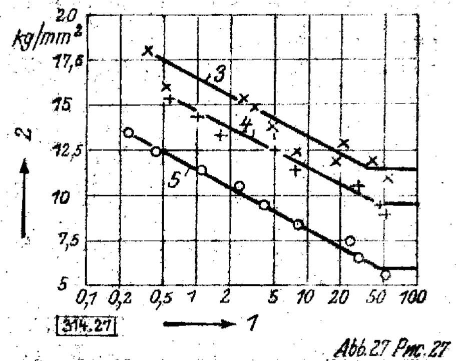
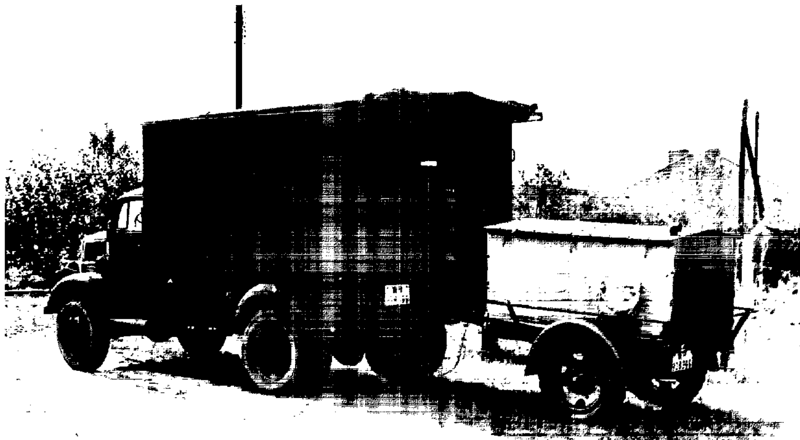


Abb. 27 Рис. 27



355.1 Abb.1 Рис. 1



355.2 Abb.2 Рис.2

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

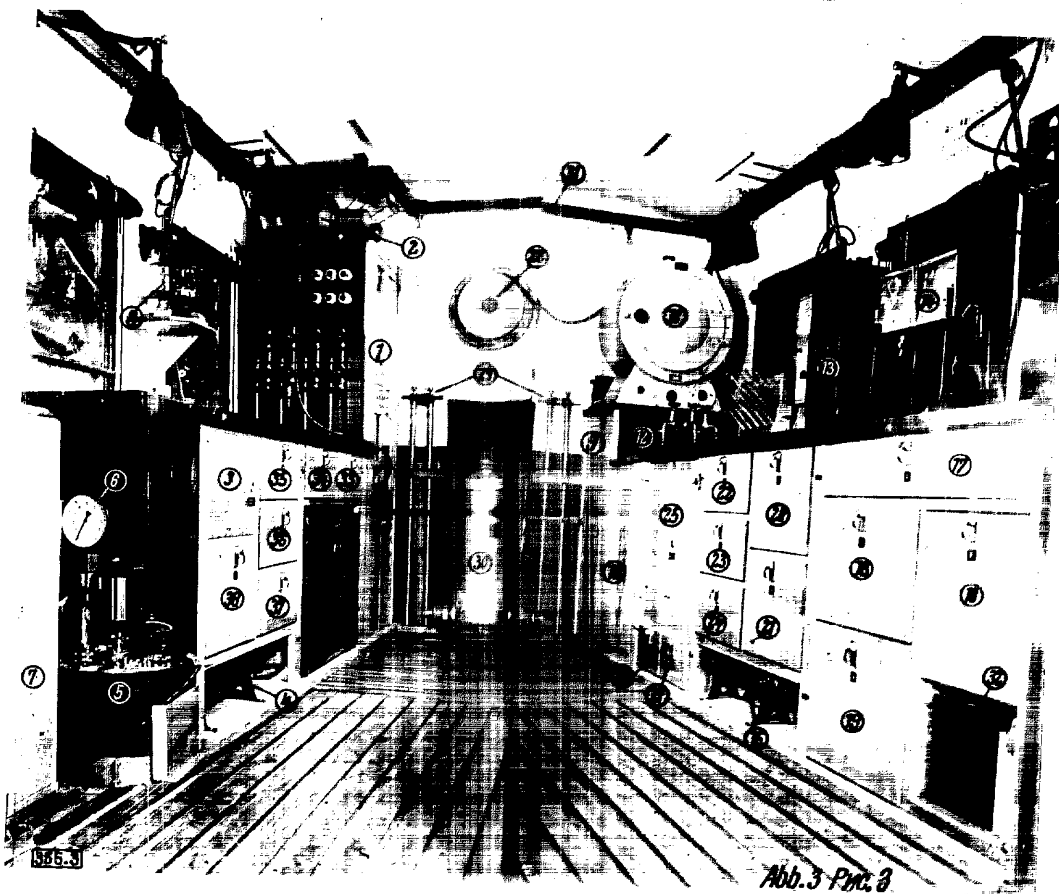
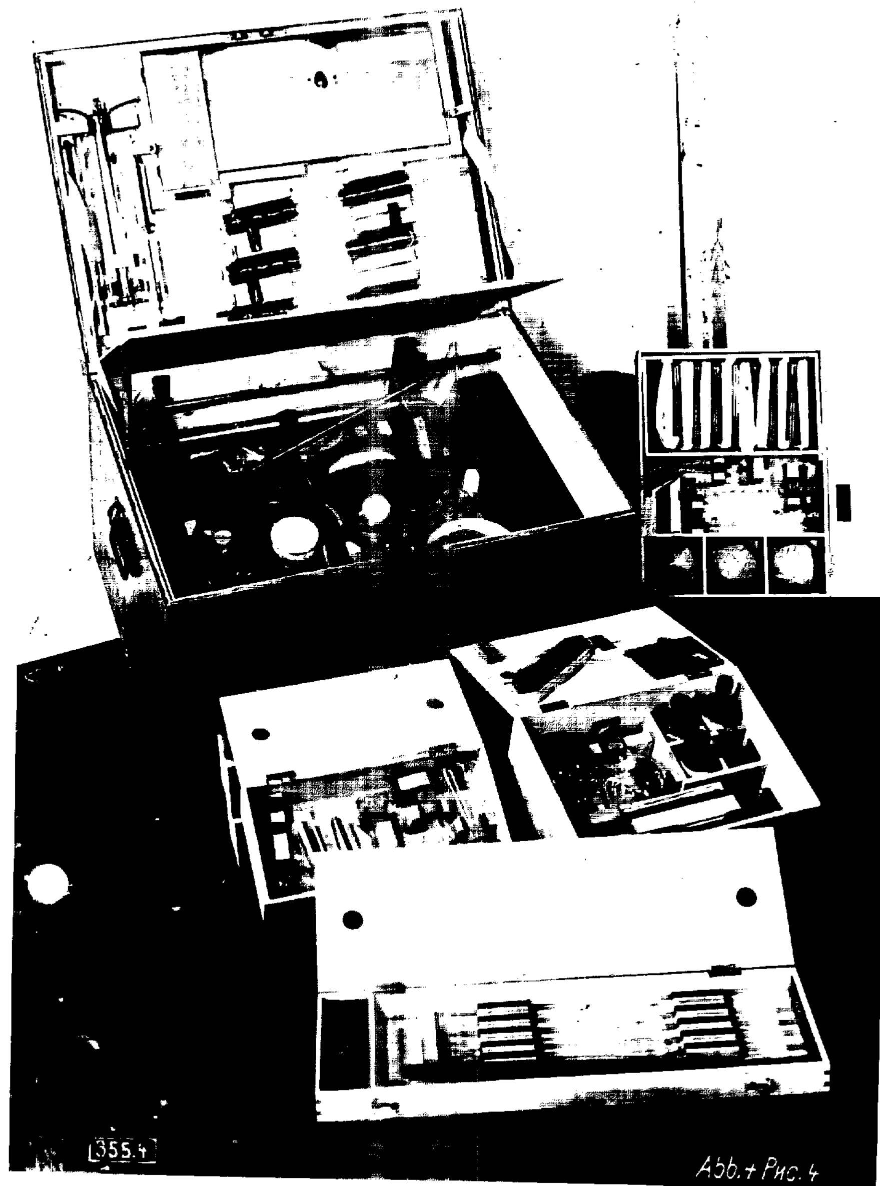


Abb.3 Рис.3



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

Hilfslinie I
Вспомогательная линия I

Hilfslinie II
Вспомогательная линия II

Доля масла большей вязкости в % объема
Anteil des Öles mit höherer Viskosität in Volumen %

°E

cSt



Temperatur Температура

357.13

Abb. 13 Рис. 13

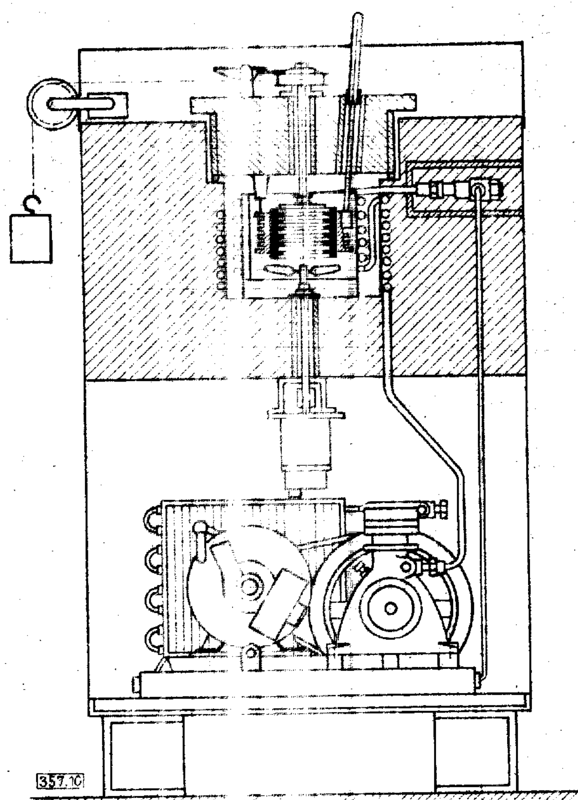


Abb. 10 Рис. 10

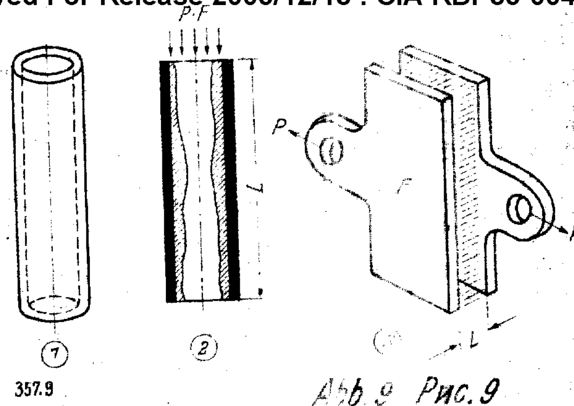


Abb.9 Рис.9

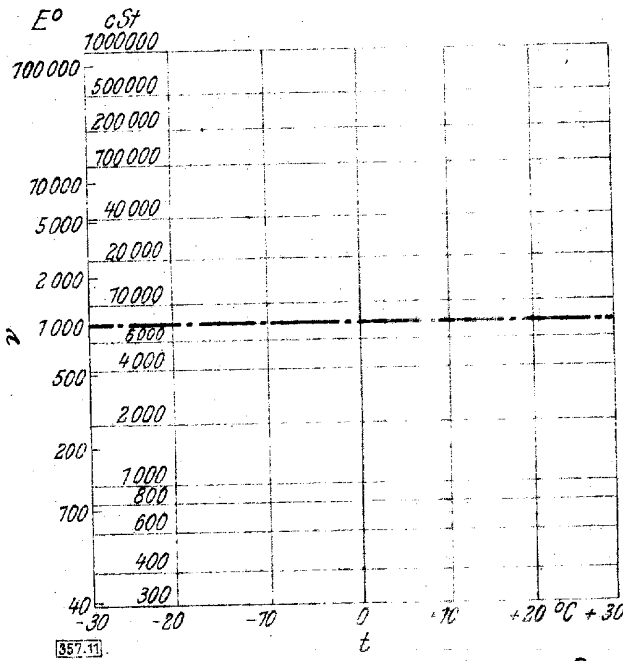


Abb.11 Рис.11

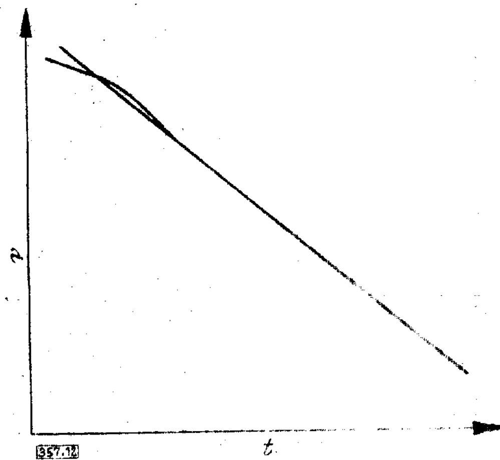


Abb.12 Рис.12

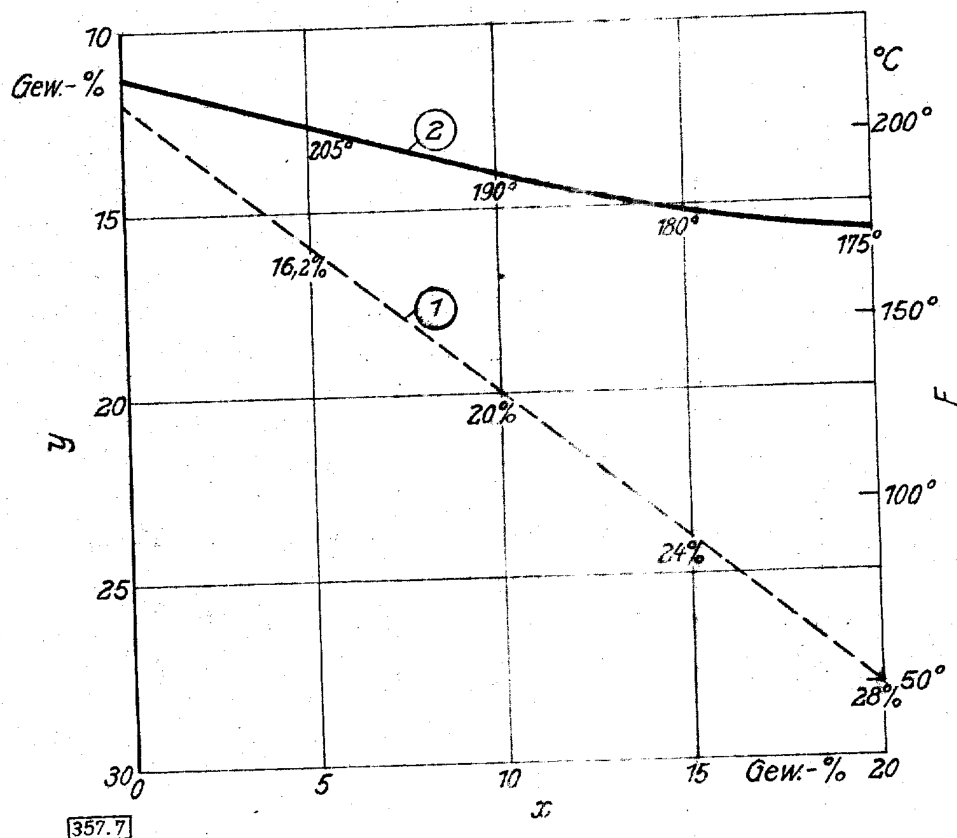


Abb. 7 Рис. 7

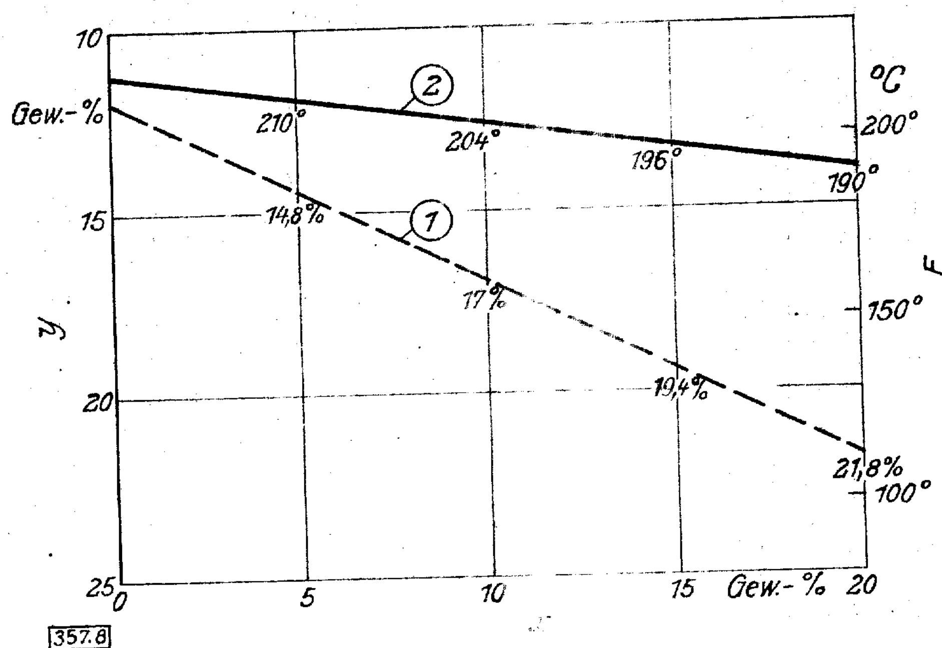


Abb. 8 Рис. 8

10 Gew.-%
15
20
25
30
y
0 5 10 15 Gew.-% 20
x
200°
°C
150°
F
100°
50°
15°
17%
①
2[illegible]%
27%
32%
55°
②
35[illegible]
25°

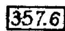


Abb. 6 Рис. 6

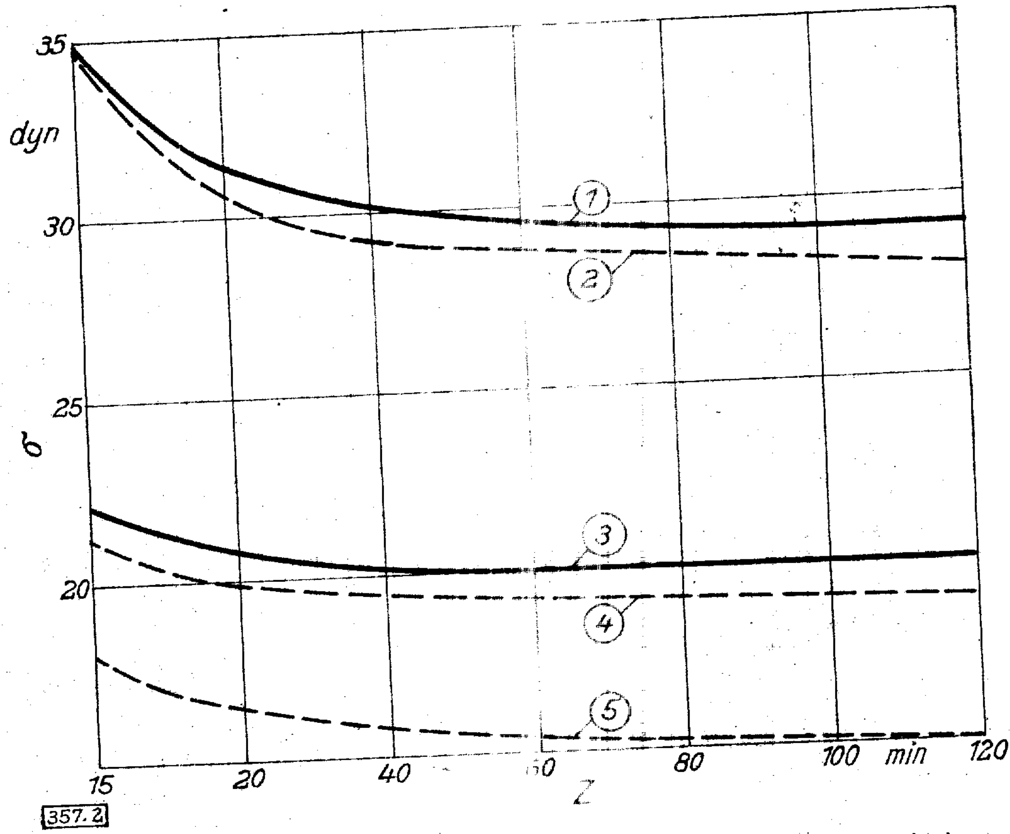


Abb. 2 Рис. 2

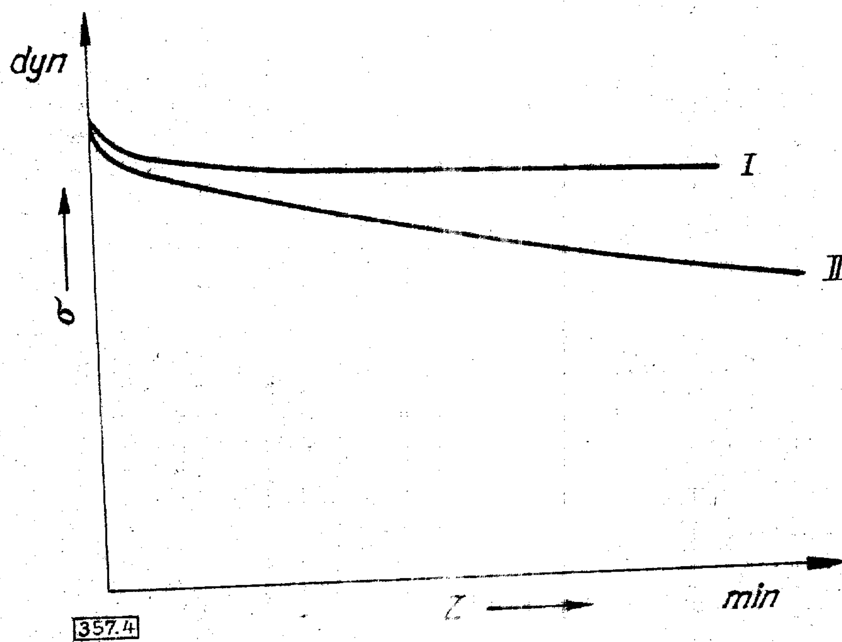


Abb. 4 Рис. 4

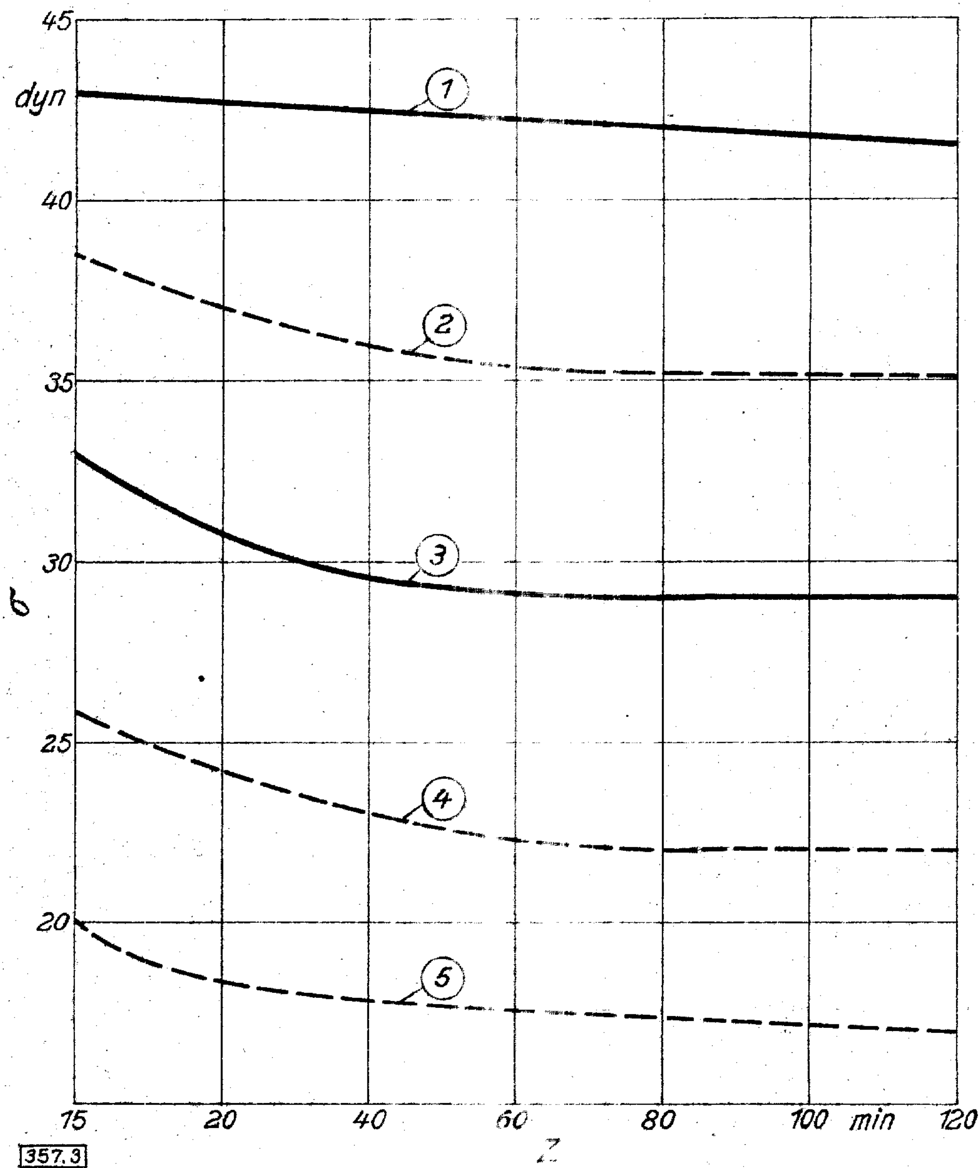


Abb.3 Рис.3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

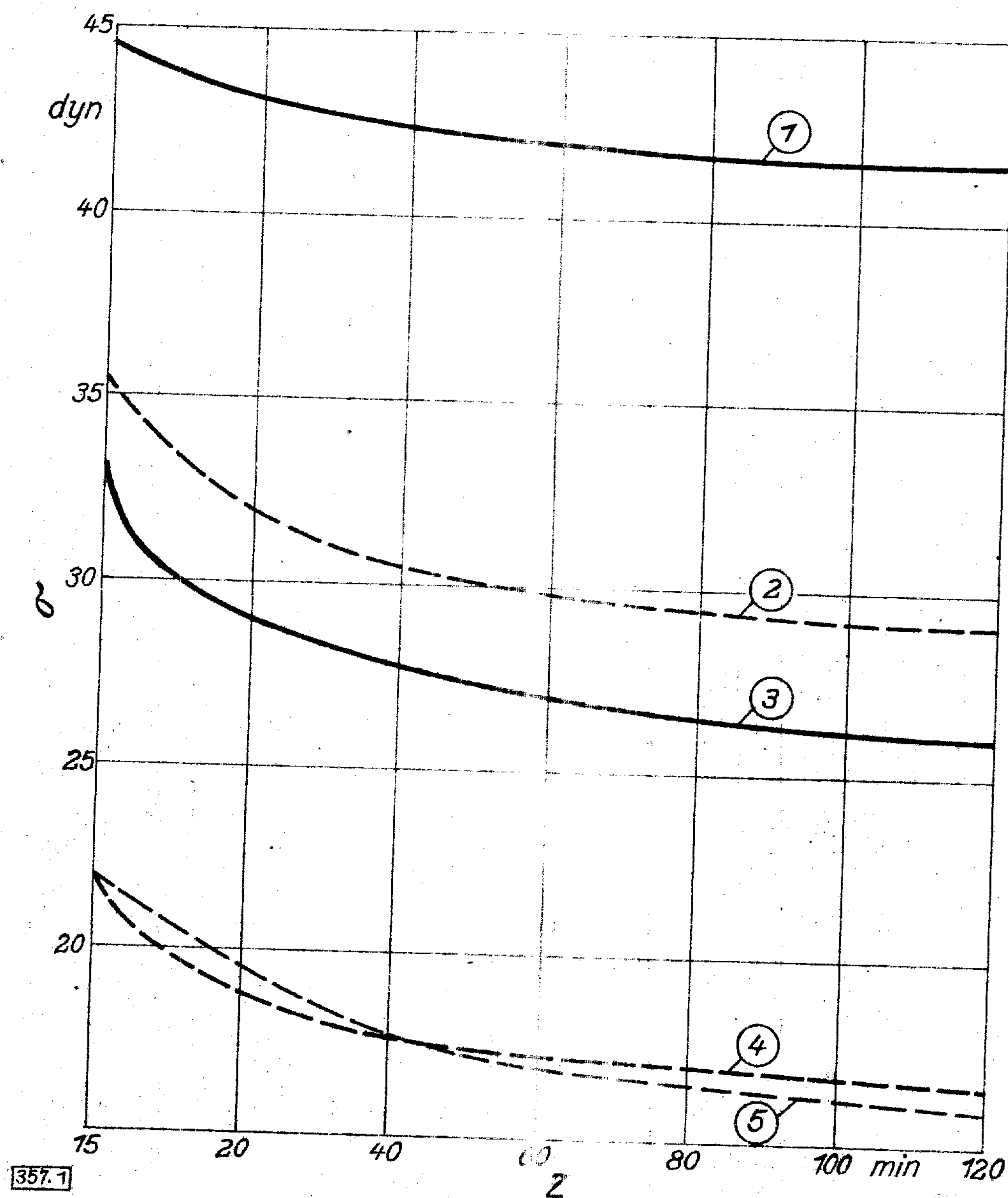


Abb. 1 Рис. 1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

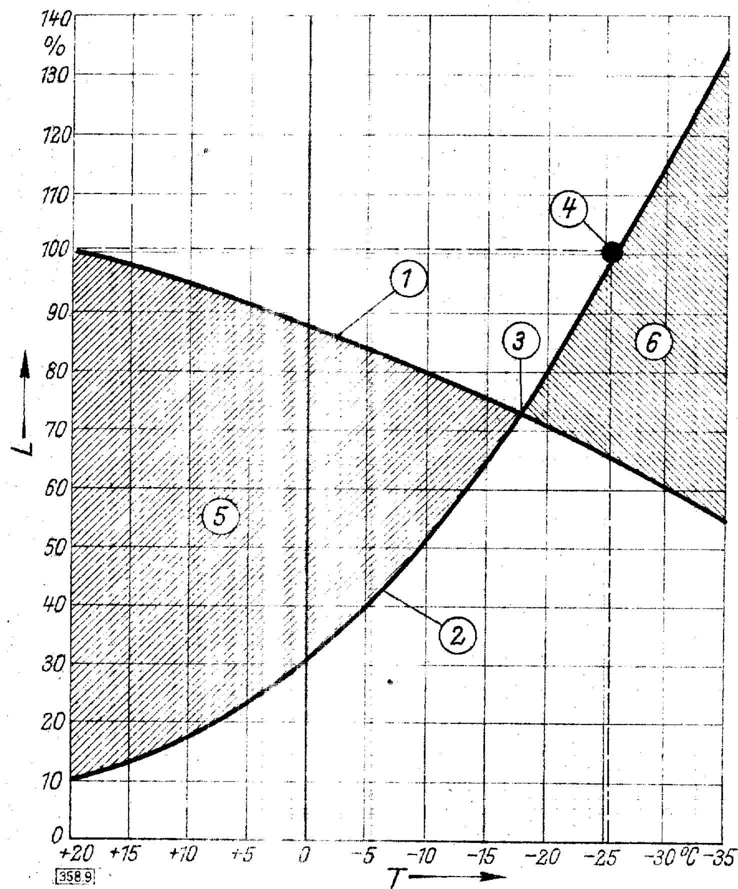

140
%
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
L
+20 +15 +10 +5 0 -5 -10 -15 -20 -25 -30 °C -35
T
1
2
3
4
5
6
358.9

Abb.9 Рис.9

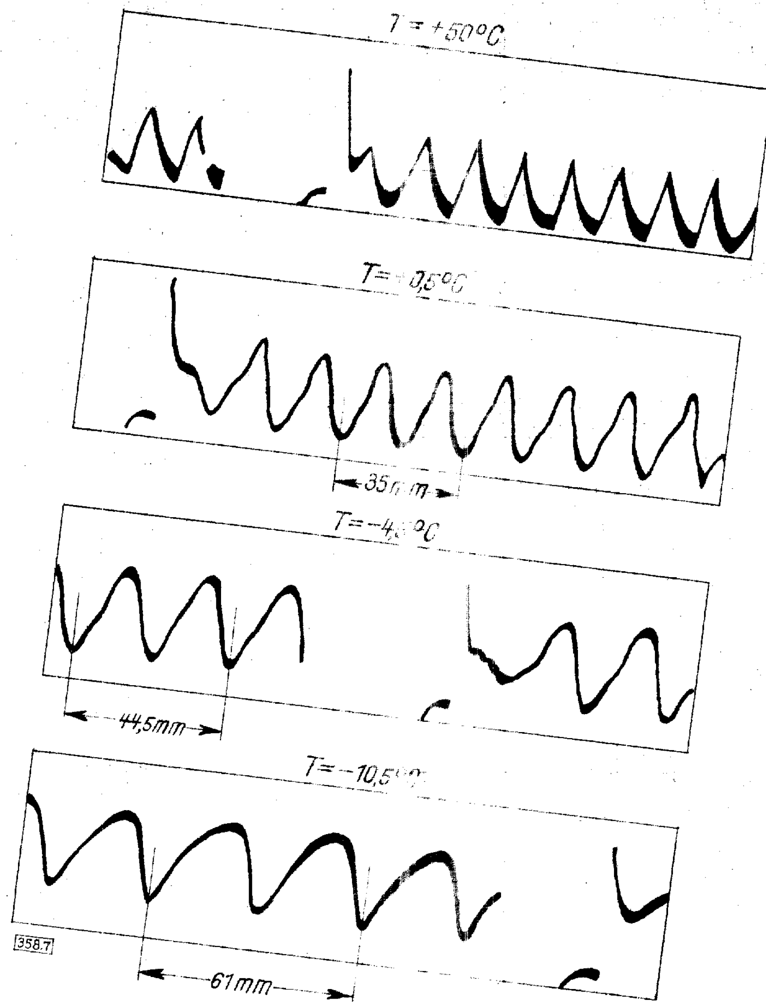


Abb.7 Рис.7

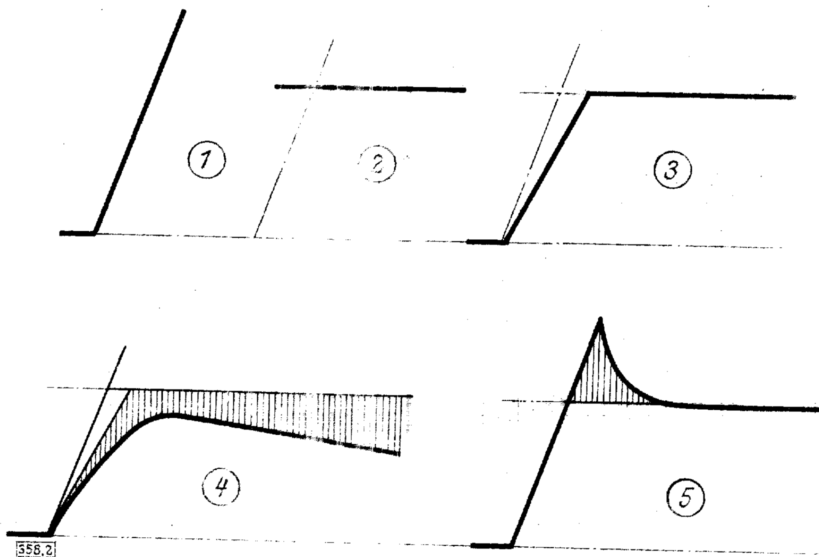


Abb.2 Рис.2

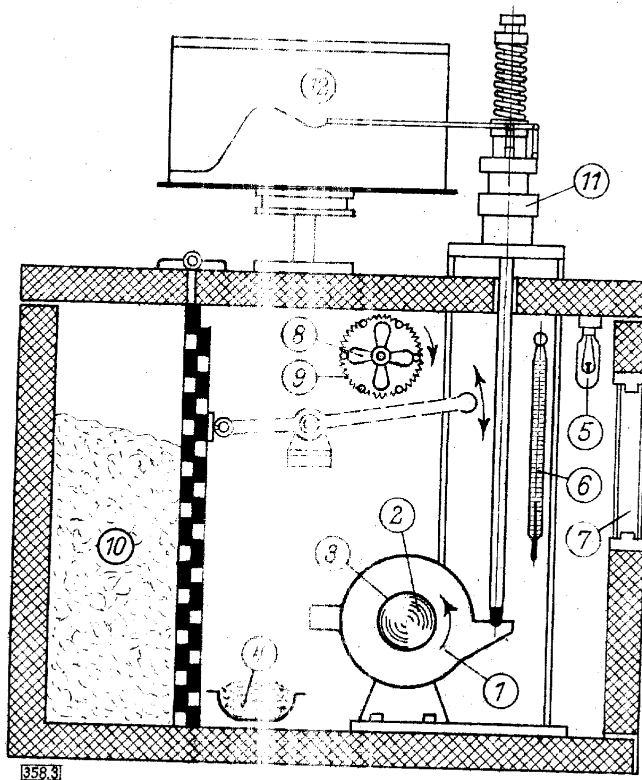


Abb.3 Рис.3

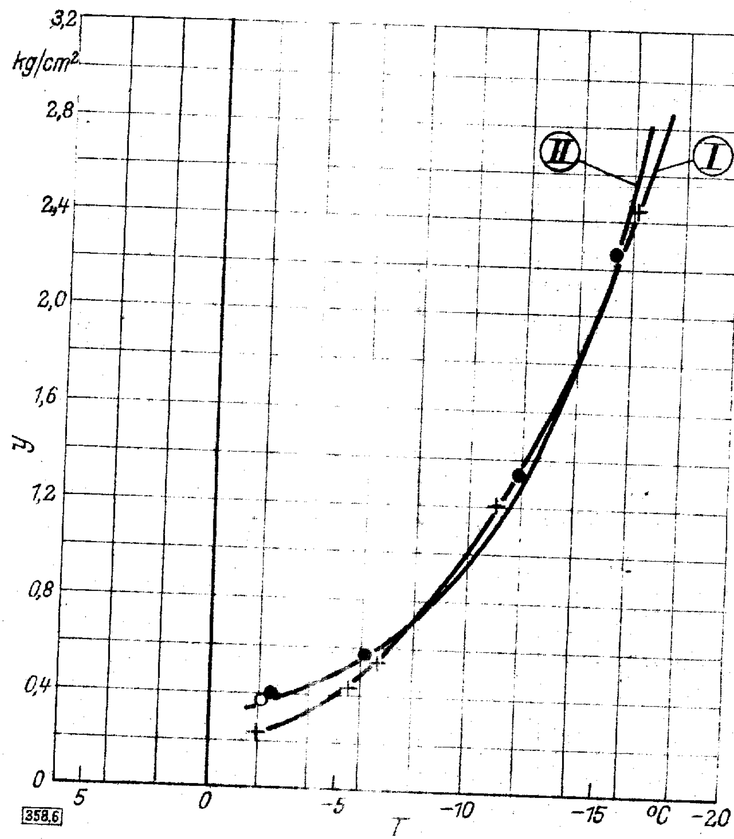
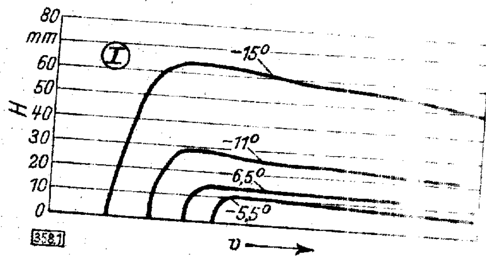


Abb.6 Рис. 6



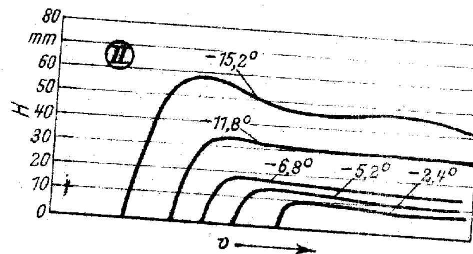
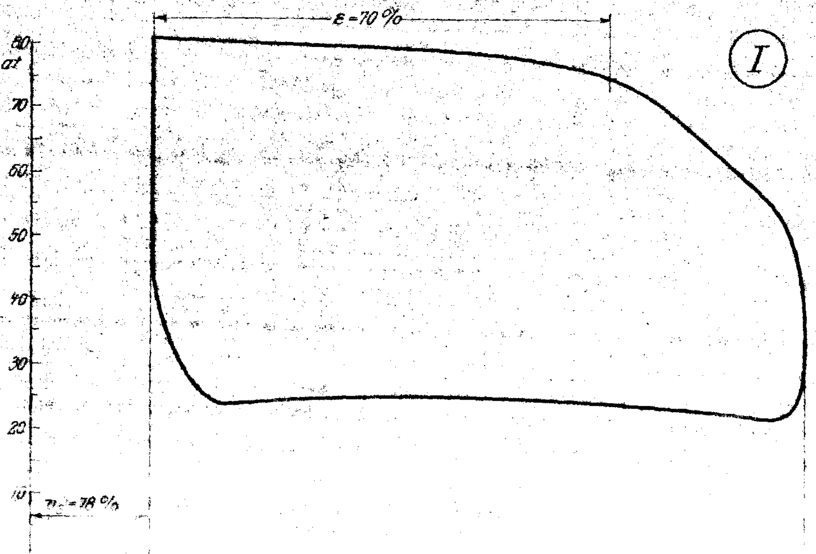
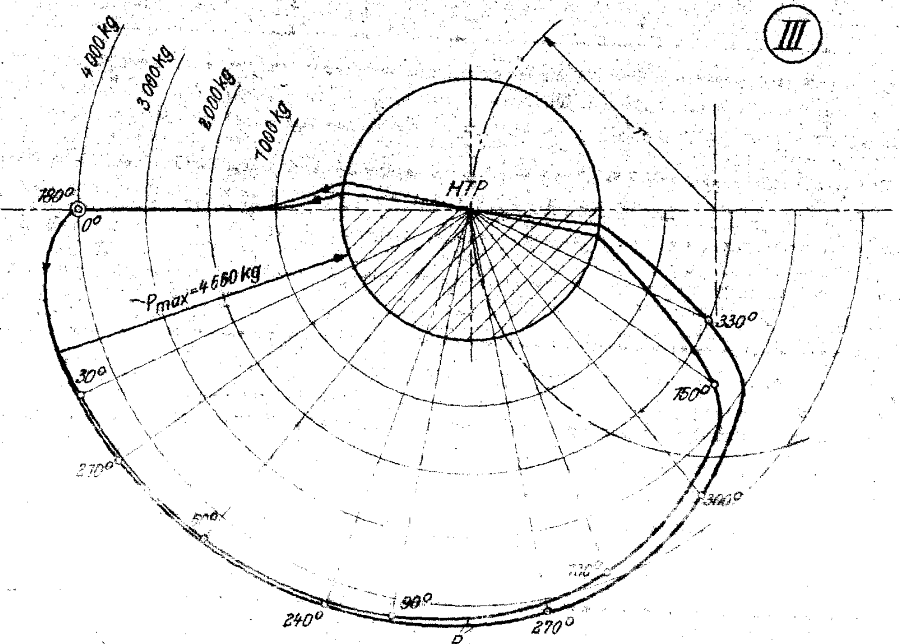
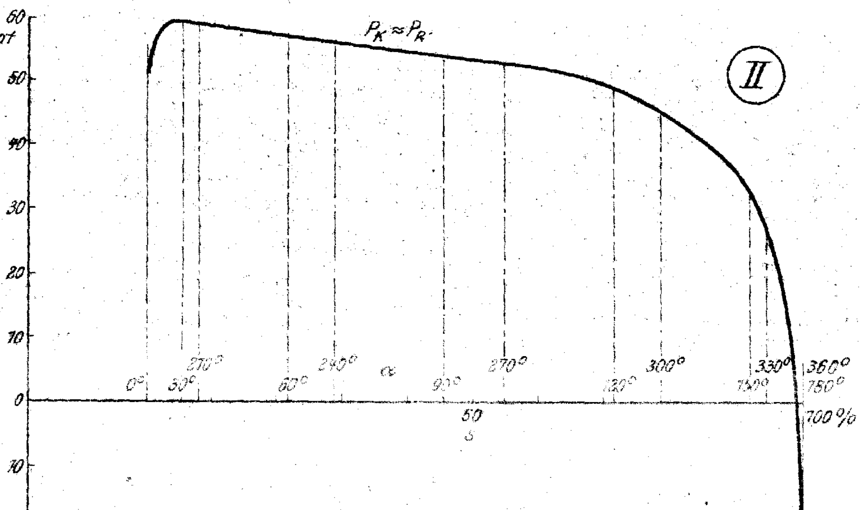


Abb.1 Рис. 1


I
ε = 70 %
80
at
70
60
50
40
30
20
10
0
50
s
100 %


III
4000 kg
3000 kg
2000 kg
1000 kg
HTP
180°
0°
~Pmax=4680 kg
330°
150°
30°
270°
300°
240°
90°
P
270°


II
60
at
50
40
30
20
10
0
10
20
$P_K \approx P_R$
0°
30°
270°
60°
240°
α
90°
270°
300°
330°
360°
150°
180°
50
s
100 %
370.1

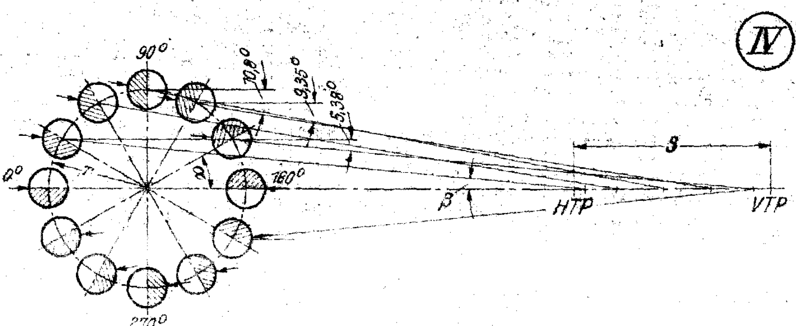
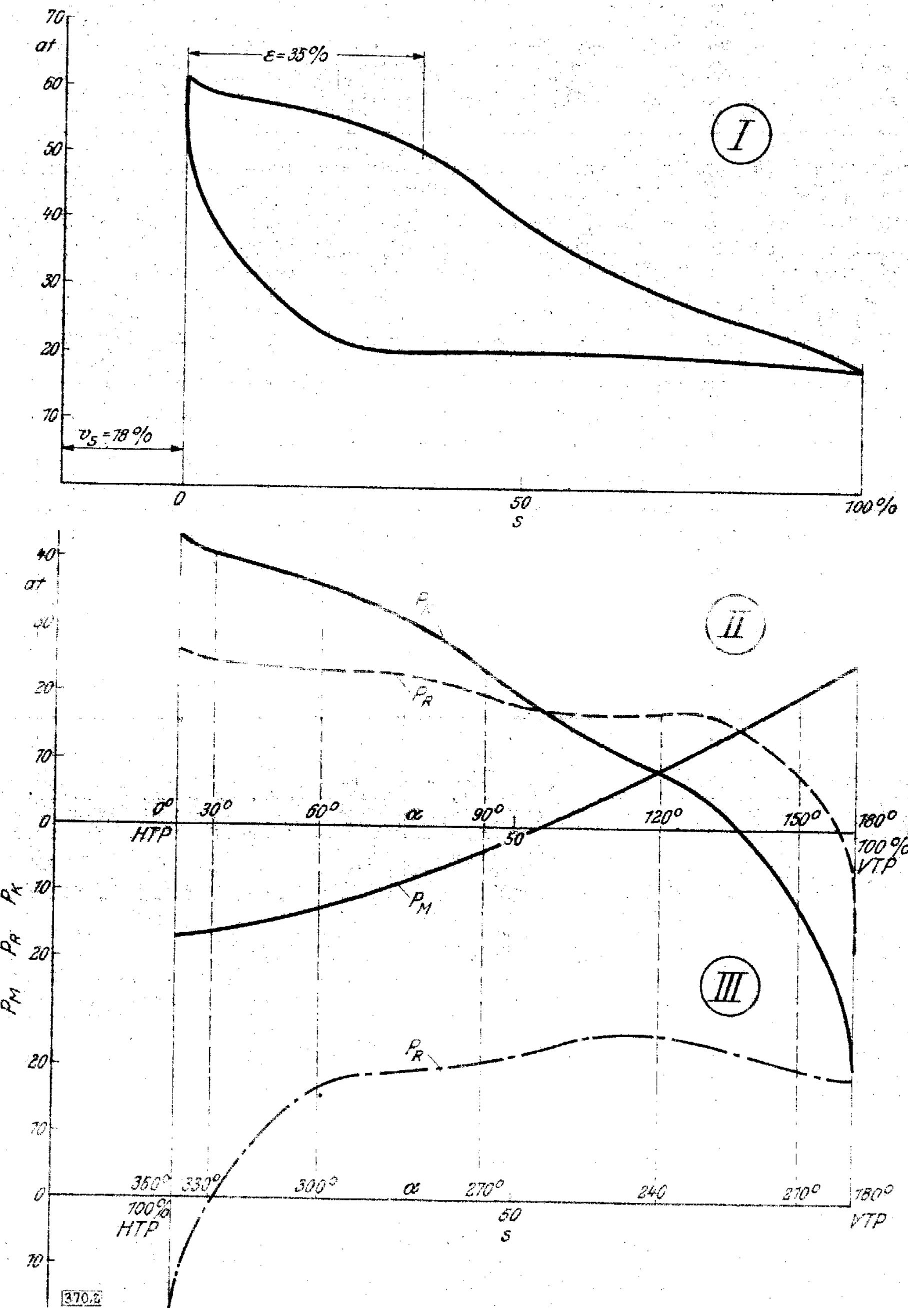
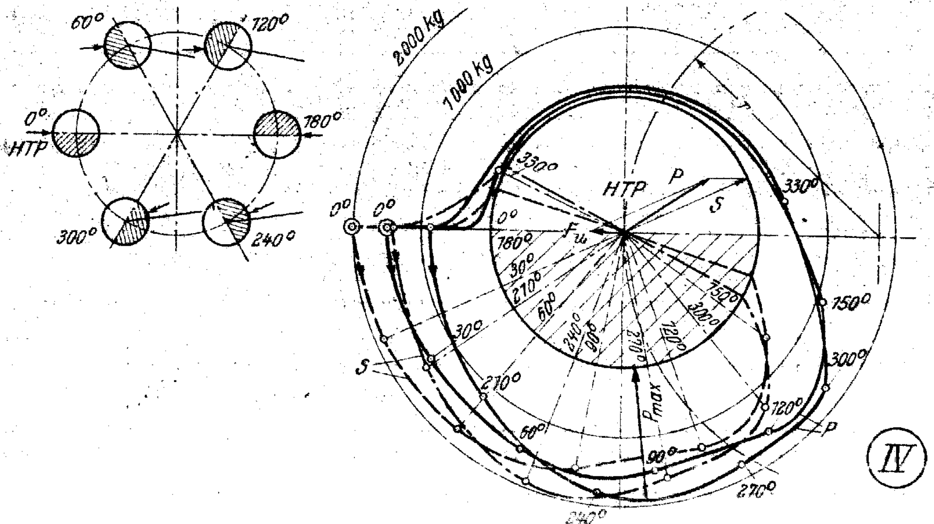

IV
90°
0°
180°
270°
β
s
HTP
VTP

Abb. 1 Рис. 1





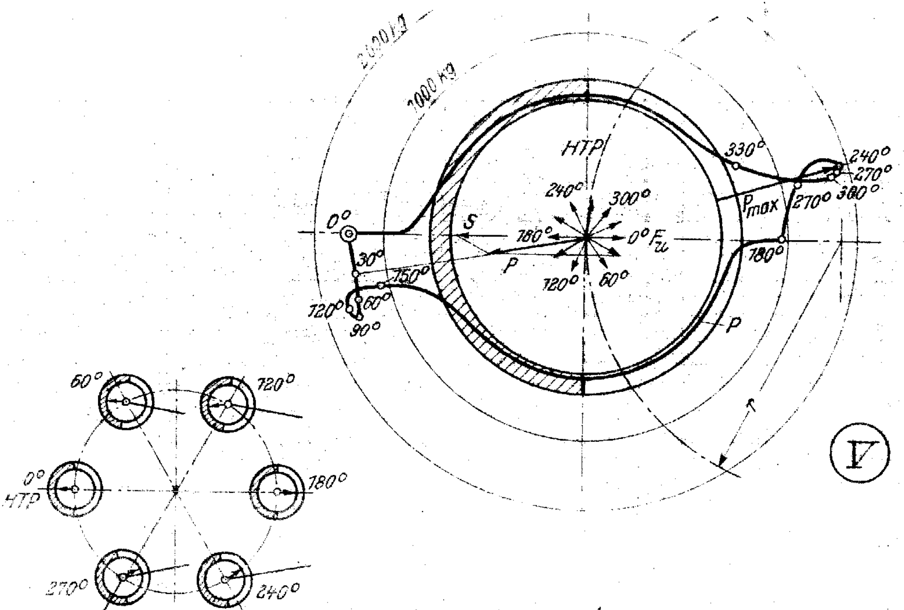
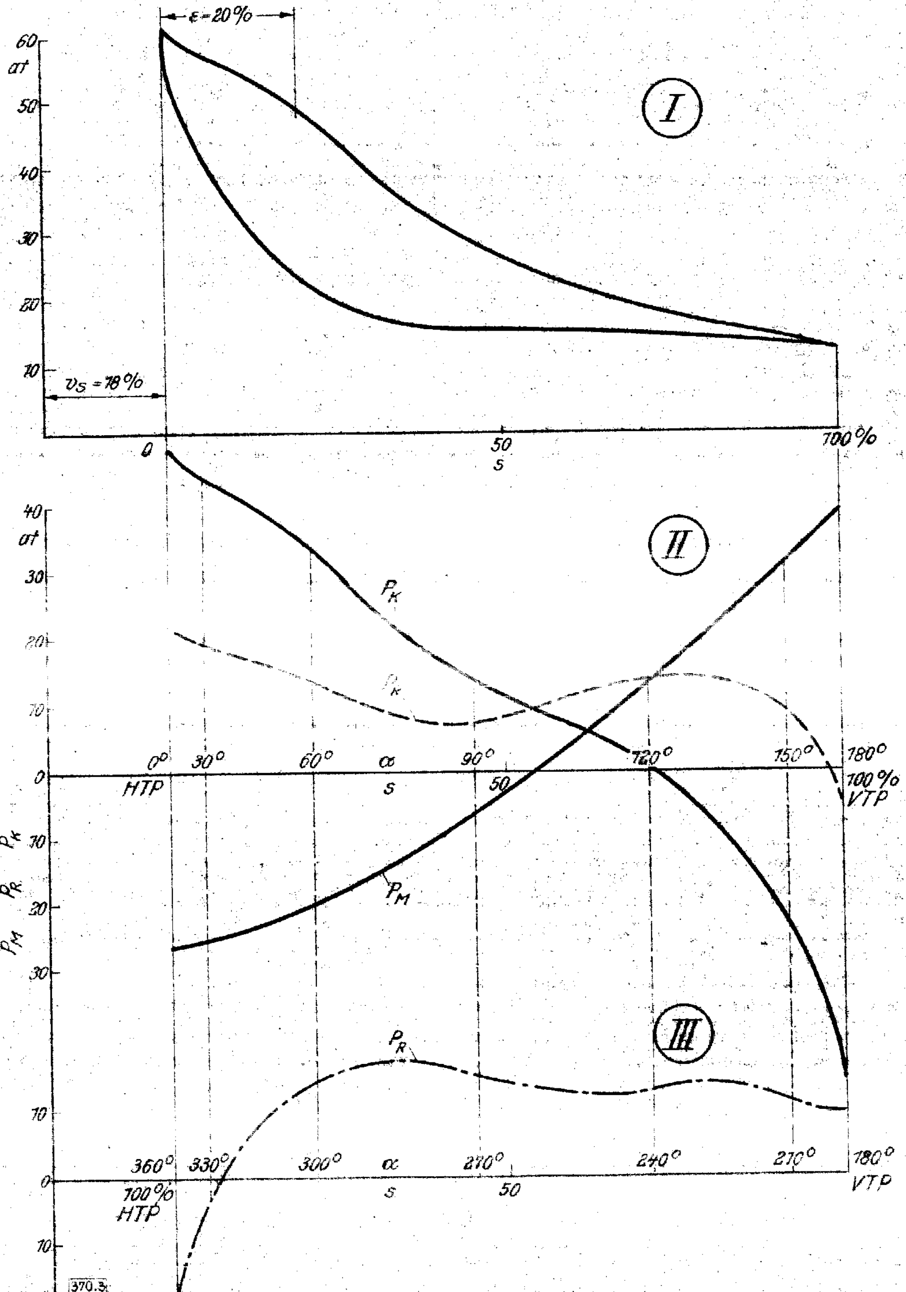
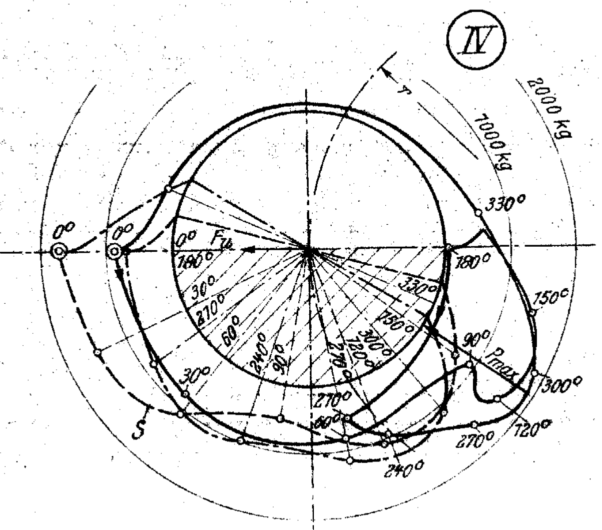


Abb.2 Рис.2





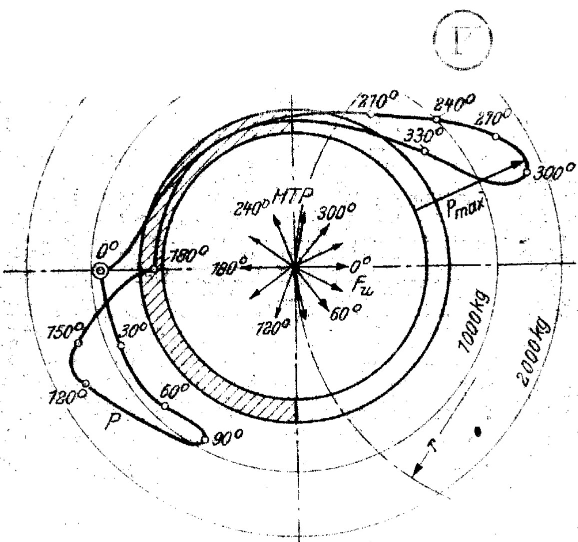
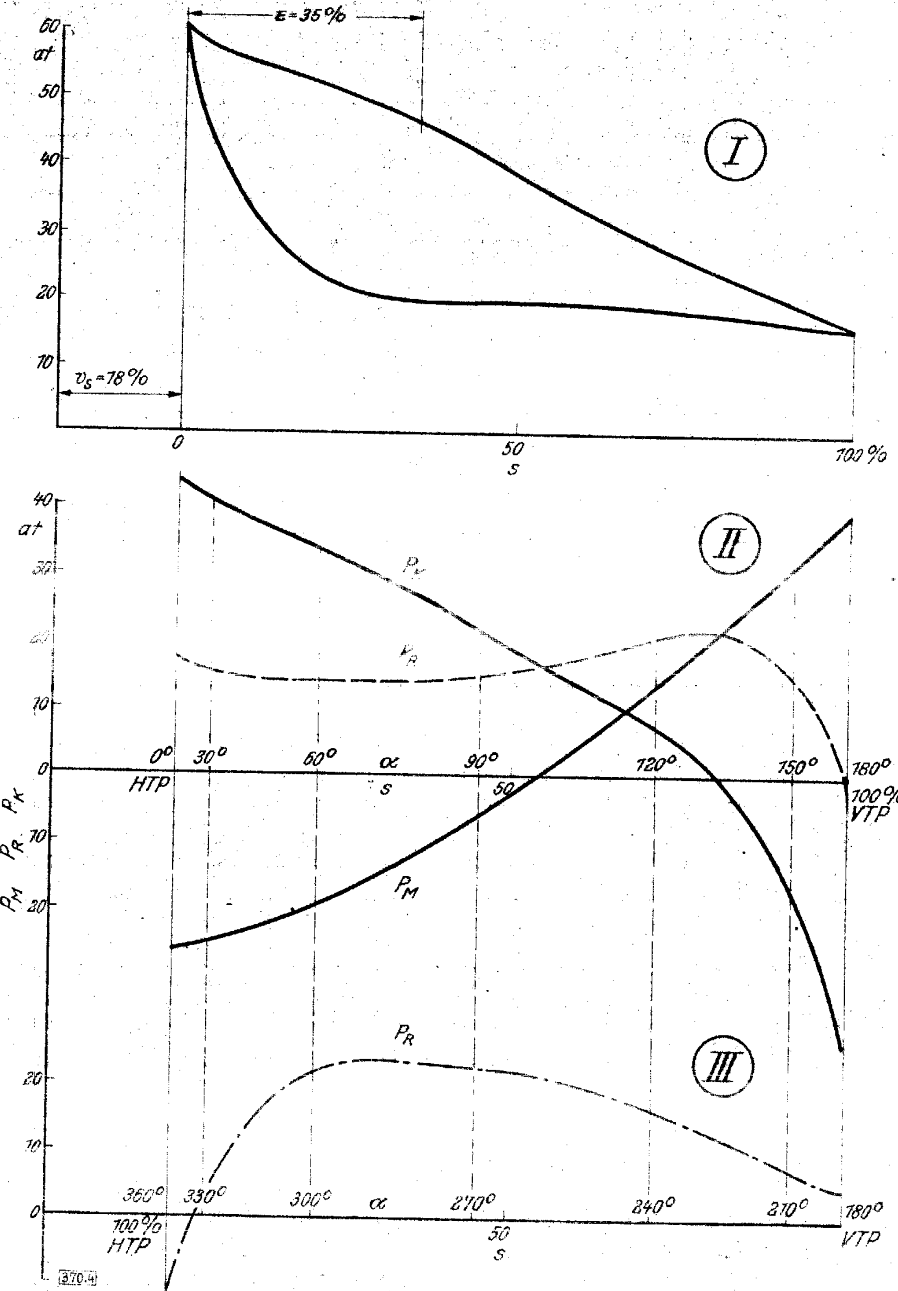


Abb.3 Рис.3

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2


I
at
ε = 35%
v_s = 78%
0
50
s
100%
II
III
at
P_K
P_R
P_M
α
s
HTP
VTP
100%
370.4

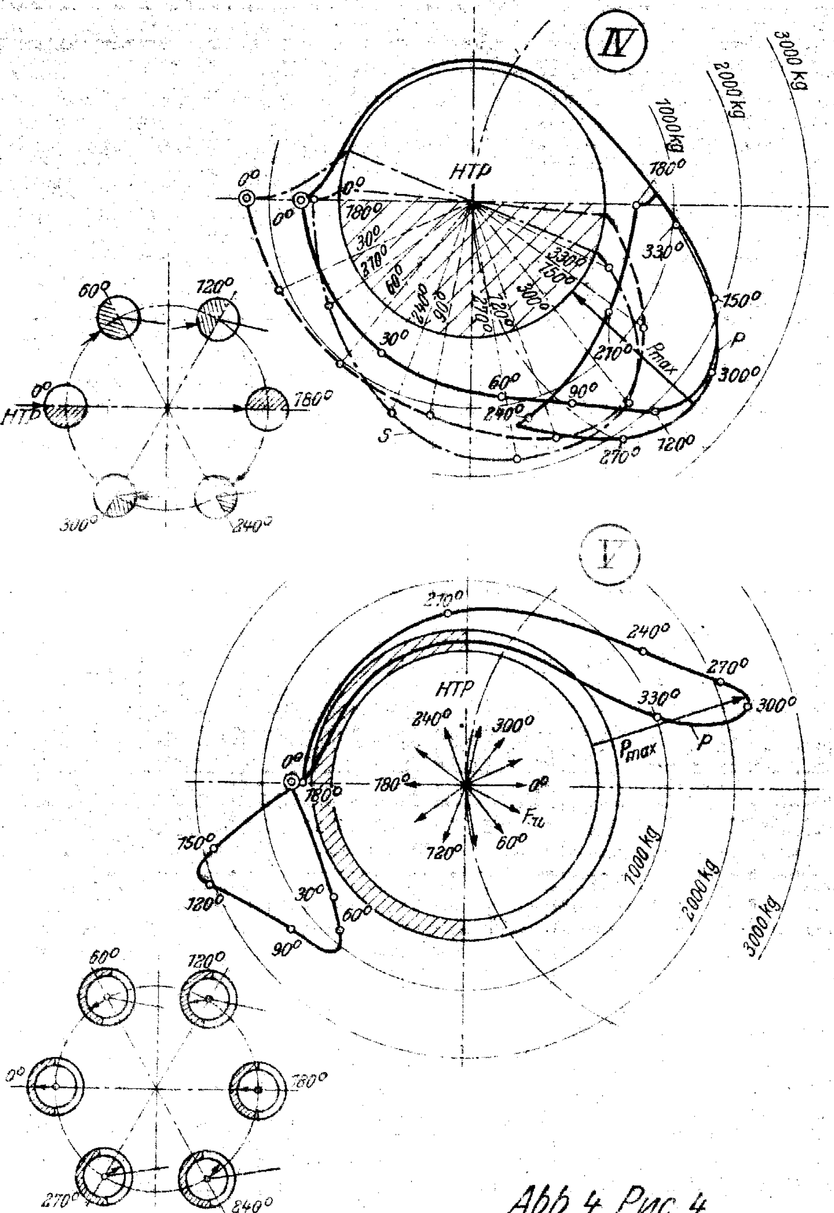
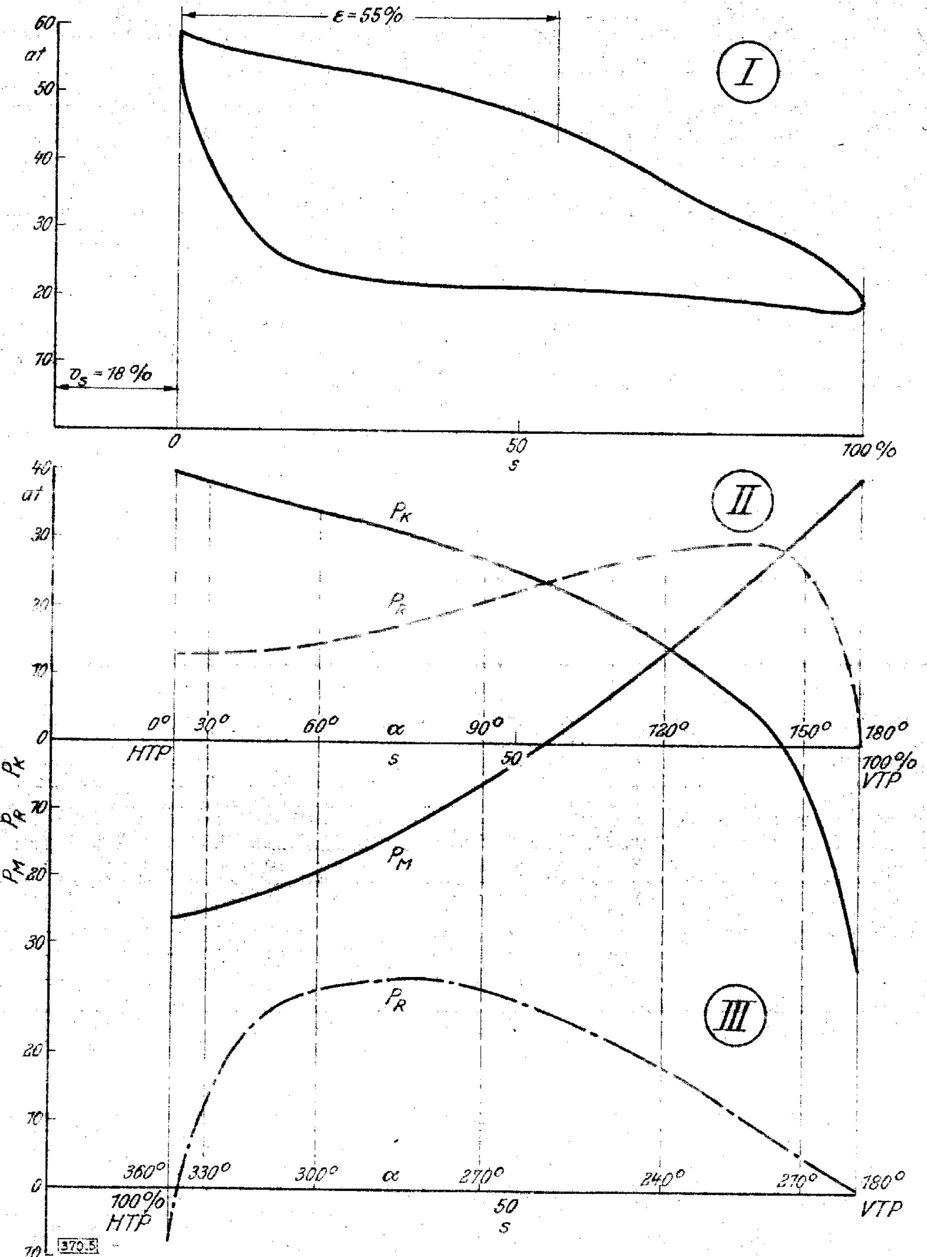
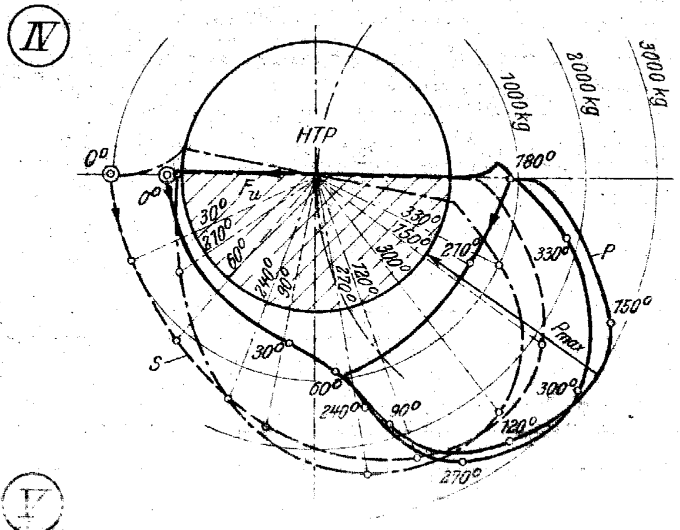

IV
1000 kg
2000 kg
3000 kg
HTP
P_{max}
P
S
V
1000 kg
2000 kg
3000 kg
HTP
P_{max}
P

Abb. 4 Рис. 4


I
ε = 55%
at
v_s = 18 %
0
50
s
100 %
II
III
Pk
PR
PM
HTP
VTP
α
100%


IV
1000 kg
2000 kg
3000 kg
HTP
P
Pmax
Fu
S

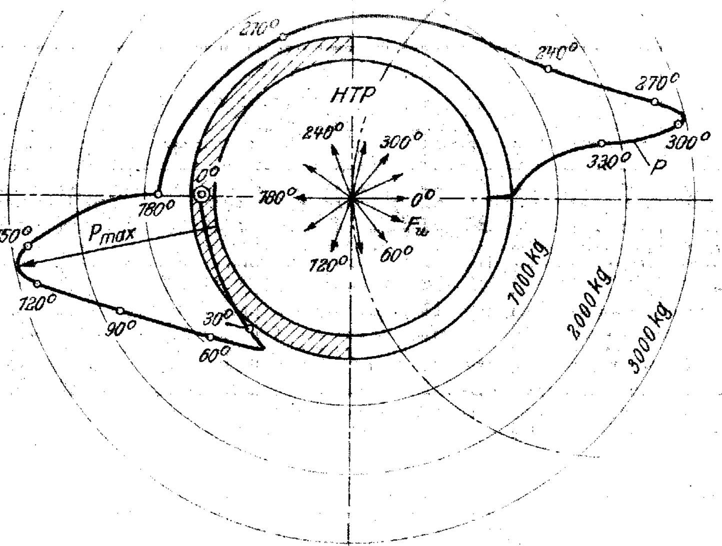
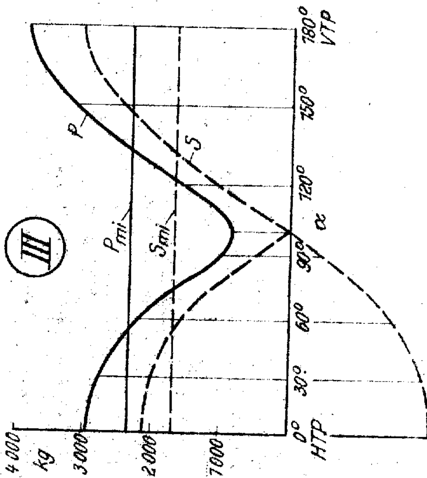
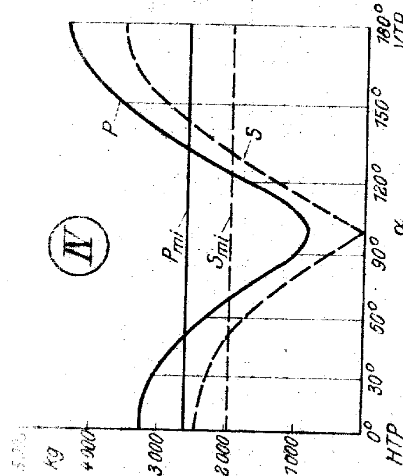

V
HTP
P
Pmax
Fu
1000 kg
2000 kg
3000 kg

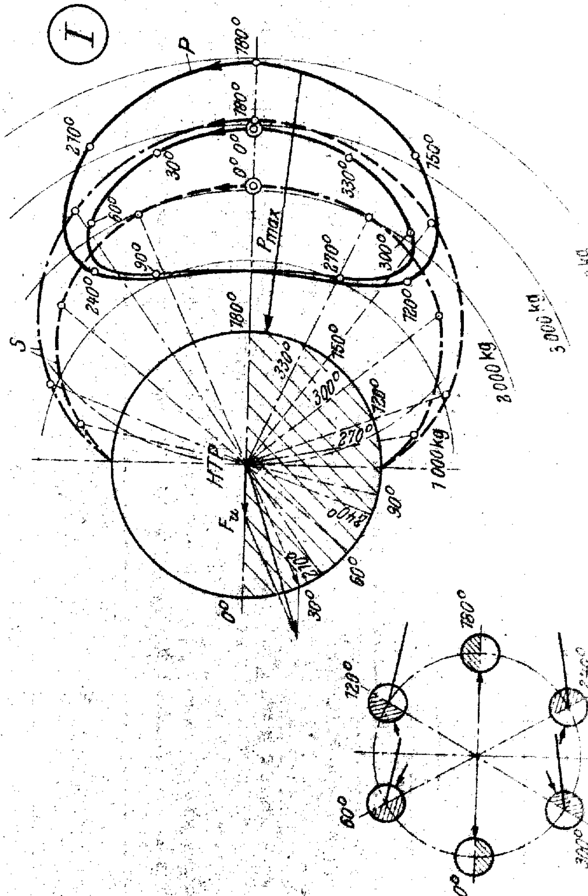
Abb.5 Рис.5



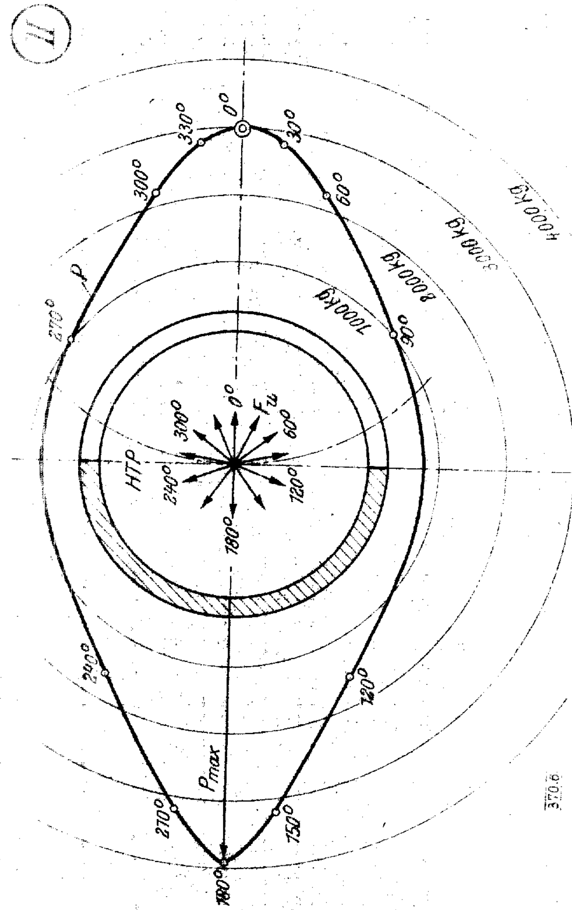
III
4 000
kg
3 000
2 000
1000
0° HTP
30°
60°
90°
120°
150°
180° VTP
α
P
S
P_{mi}
S_{mi}



IV
kg
4 000
3 000
2 000
1000
0° HTP
30°
50°
90°
120°
150°
180° VTP
α
P
S
P_{mi}
S_{mi}

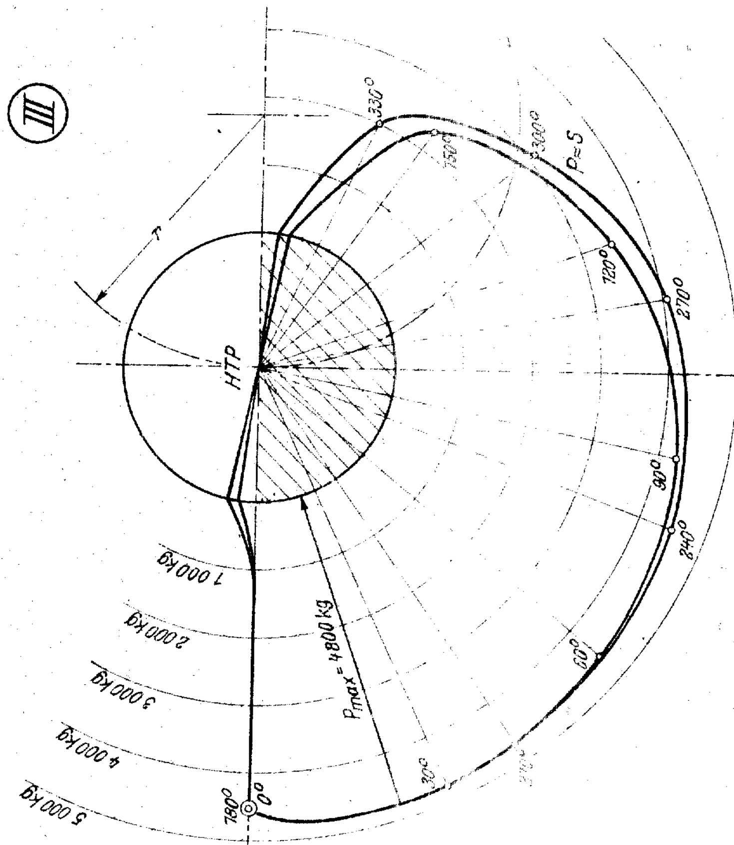


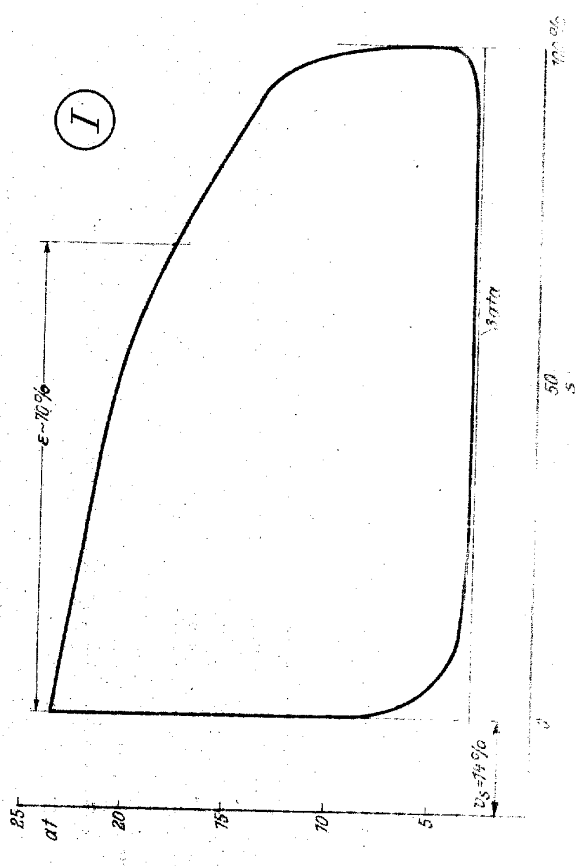
I
P
S
P_{max}
F_u
HTP
1 000 kg
2 000 kg
3 000 kg



II
P
P_{max}
F_u
HTP
1000 kg
2000 kg
3000 kg
4000 kg

Abb. 6 Рис. 6


III
HTP
r
P=S
P_{max} = 4800 kg
1 000 kg
2 000 kg
3 000 kg
4 000 kg
5 000 kg
0°
180°
30°
60°
90°
120°
150°
240°
270°
300°
330°


I
ε~70%
at
25
20
15
10
5
1 ata
50
s
100%
v_s=14%

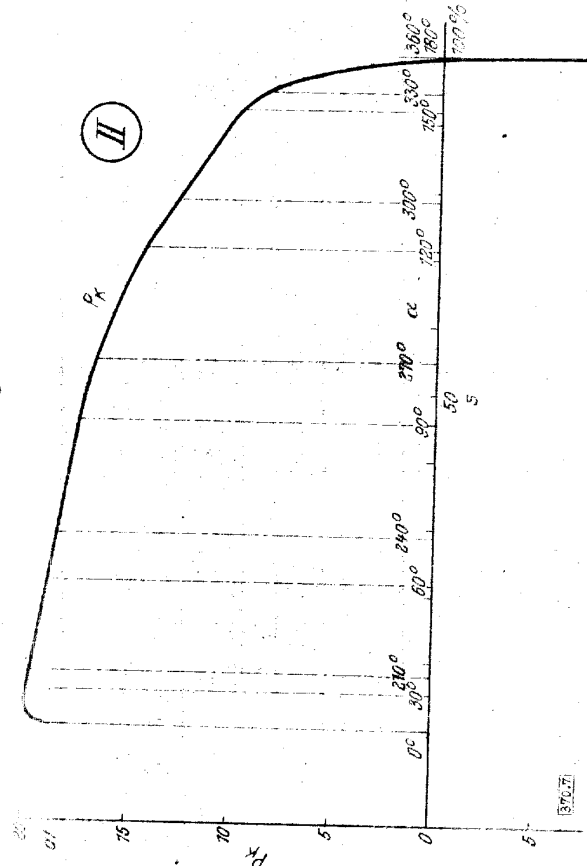
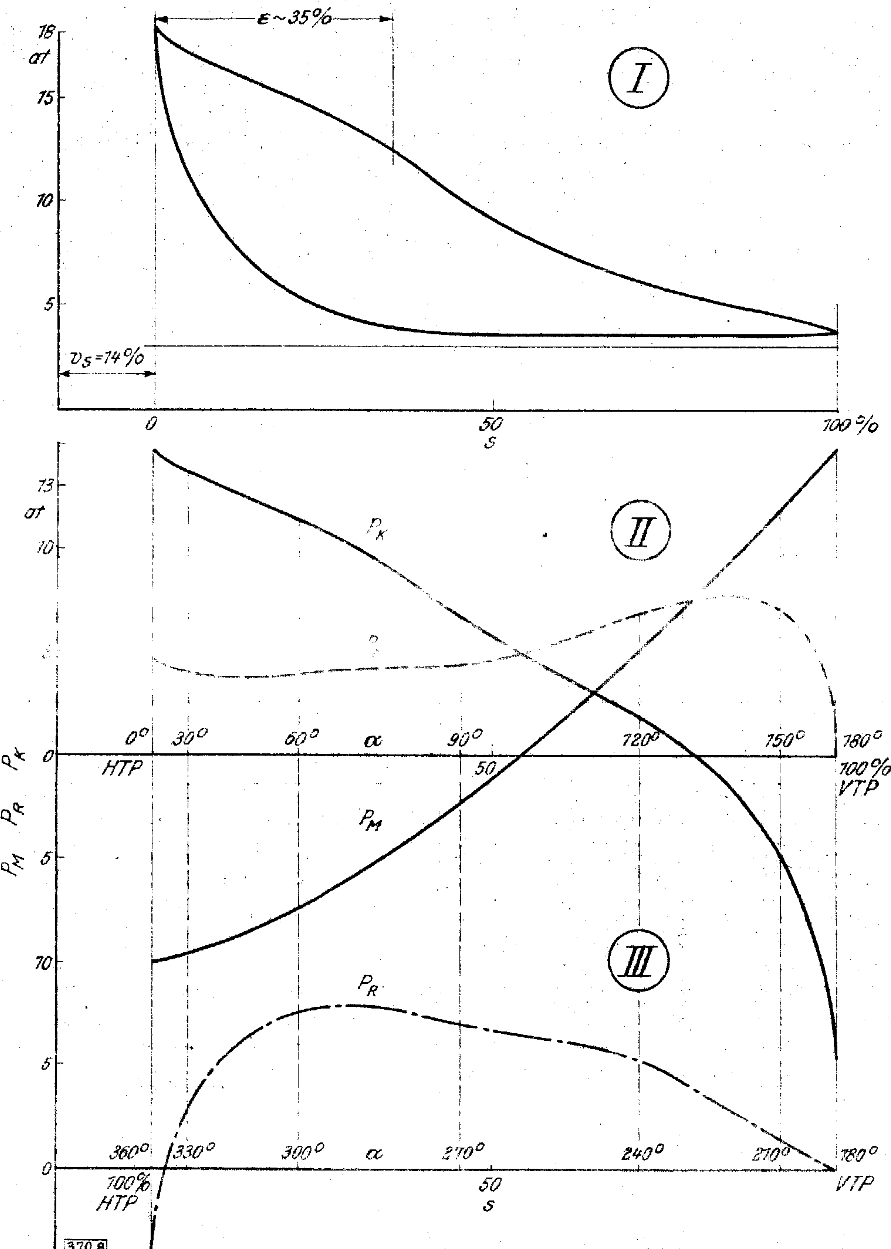
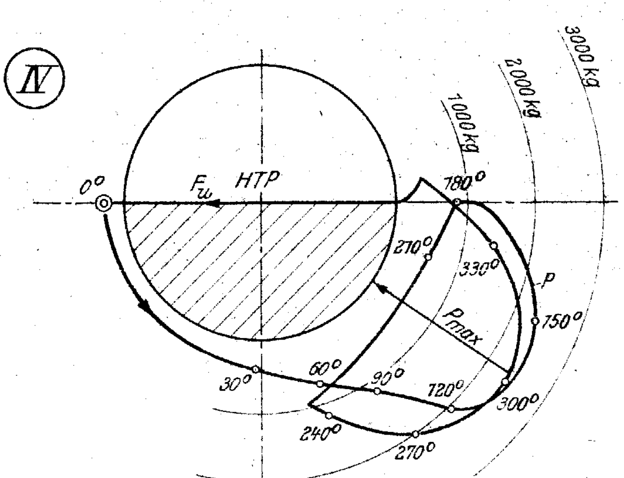

II
P_K
α
at
15
10
5
0
50
s
0°
30°
210°
60°
240°
90°
270°
120°
300°
150°
330°
180°
360°
100%

Abb.7 Рис.7


I
II
III
ε~35%
vs=14%
18
at
15
10
5
0
50
s
100%
Pk
PR
PM
α
HTP
VTP
100% HTP
100% VTP
0°
30°
60°
90°
120°
150°
180°
210°
240°
270°
300°
330°
360°
370.8


IV
3000 kg
2000 kg
1000 kg
P
Pmax
HTP
Fu
0°
30°
60°
90°
120°
150°
180°
240°
270°
300°
330°

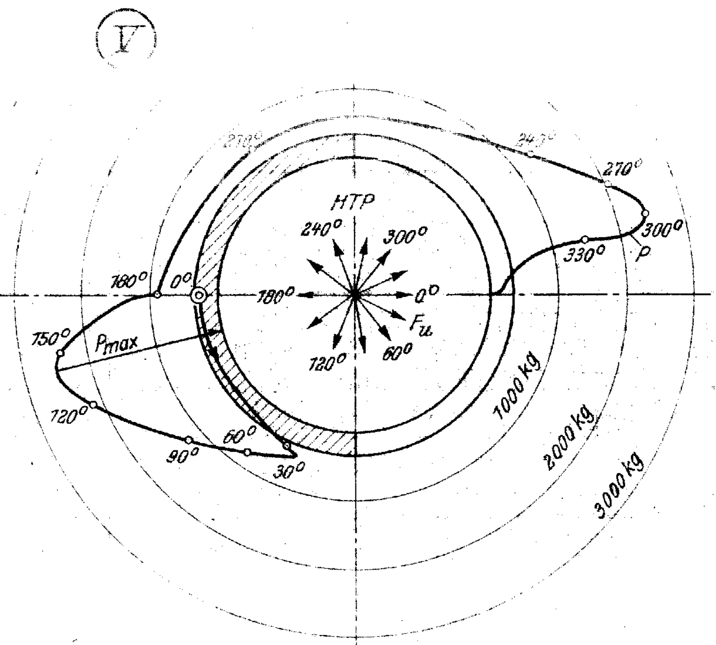
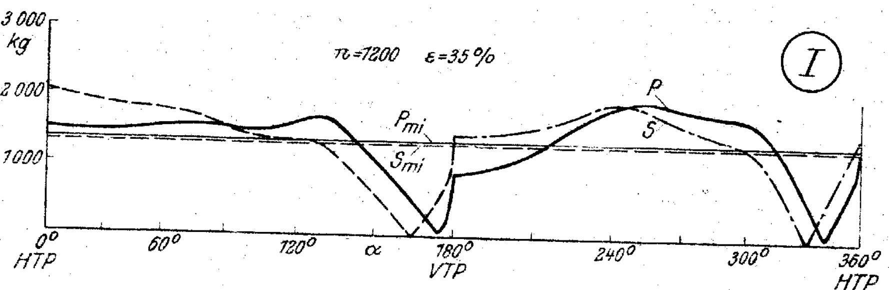
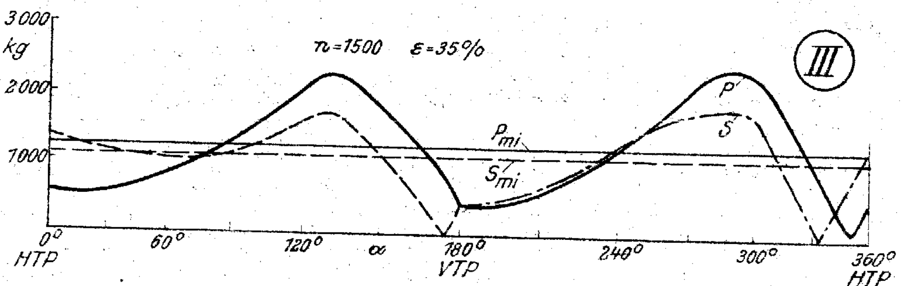
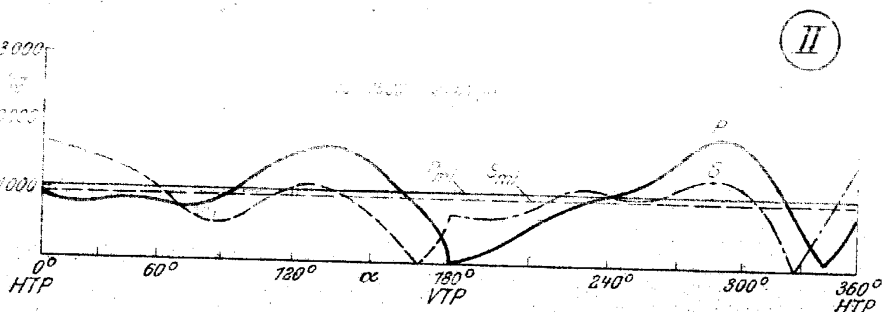
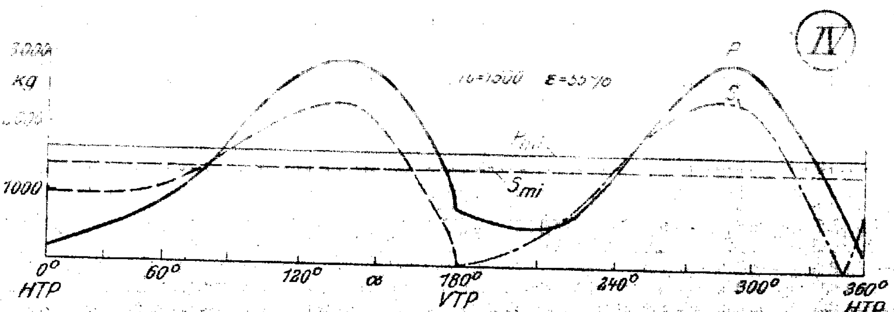

V
3000 kg
2000 kg
1000 kg
P
Pmax
HTP
Fu
0°
30°
60°
90°
120°
150°
180°
240°
270°
300°
330°

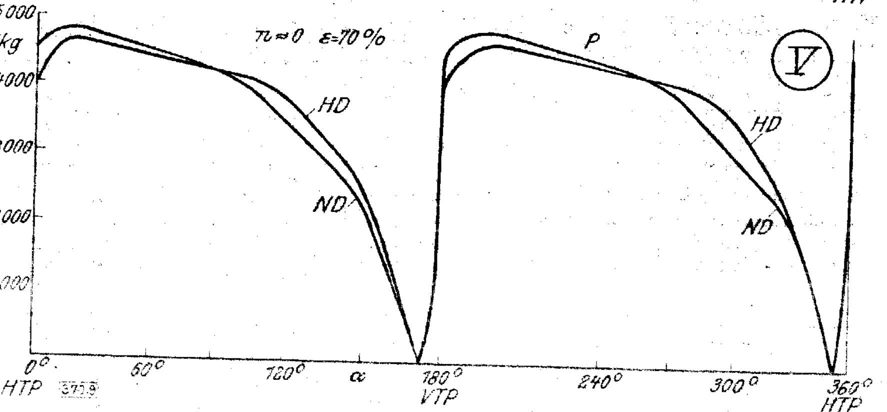
Abb. 8 Рис. 8


I
n=1200 ε=35%
3 000
kg
2 000
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
S
P_{mi}
S_{mi}


III
n=1500 ε=35%
3 000
kg
2000
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
S
P_{mi}
S_{mi}


II
3000
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
S
P_{mi}
S_{mi}


IV
kg
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
S
S_{mi}


V
n≈0 ε=70%
5000
kg
4000
3000
2000
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
HD
ND

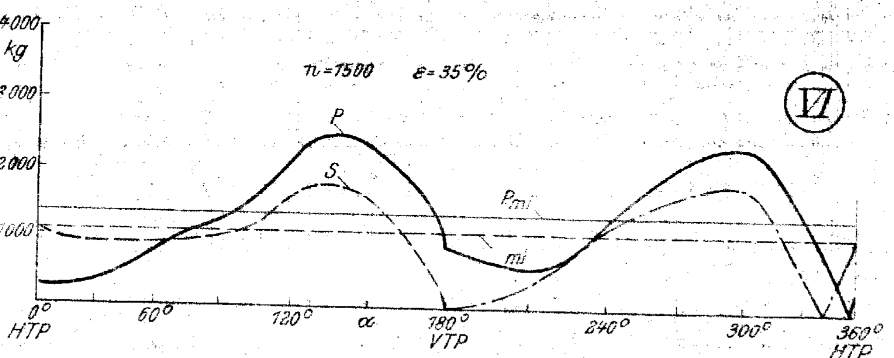
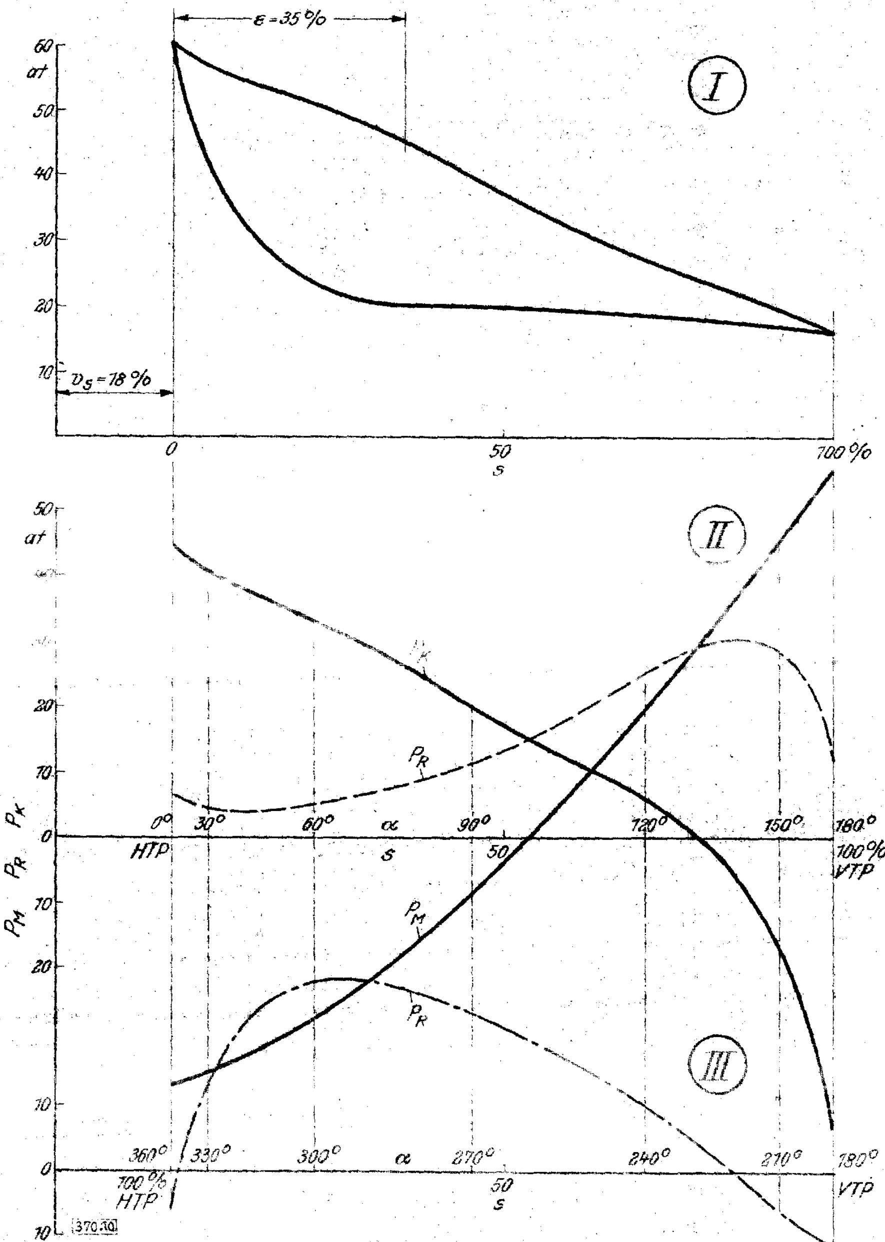

VI
n=1500 ε=35%
4000
kg
3000
2000
1000
0°
HTP
60°
120°
α
180°
VTP
240°
300°
360°
HTP
P
S
P_{mi}

Abb.9 Рис.9



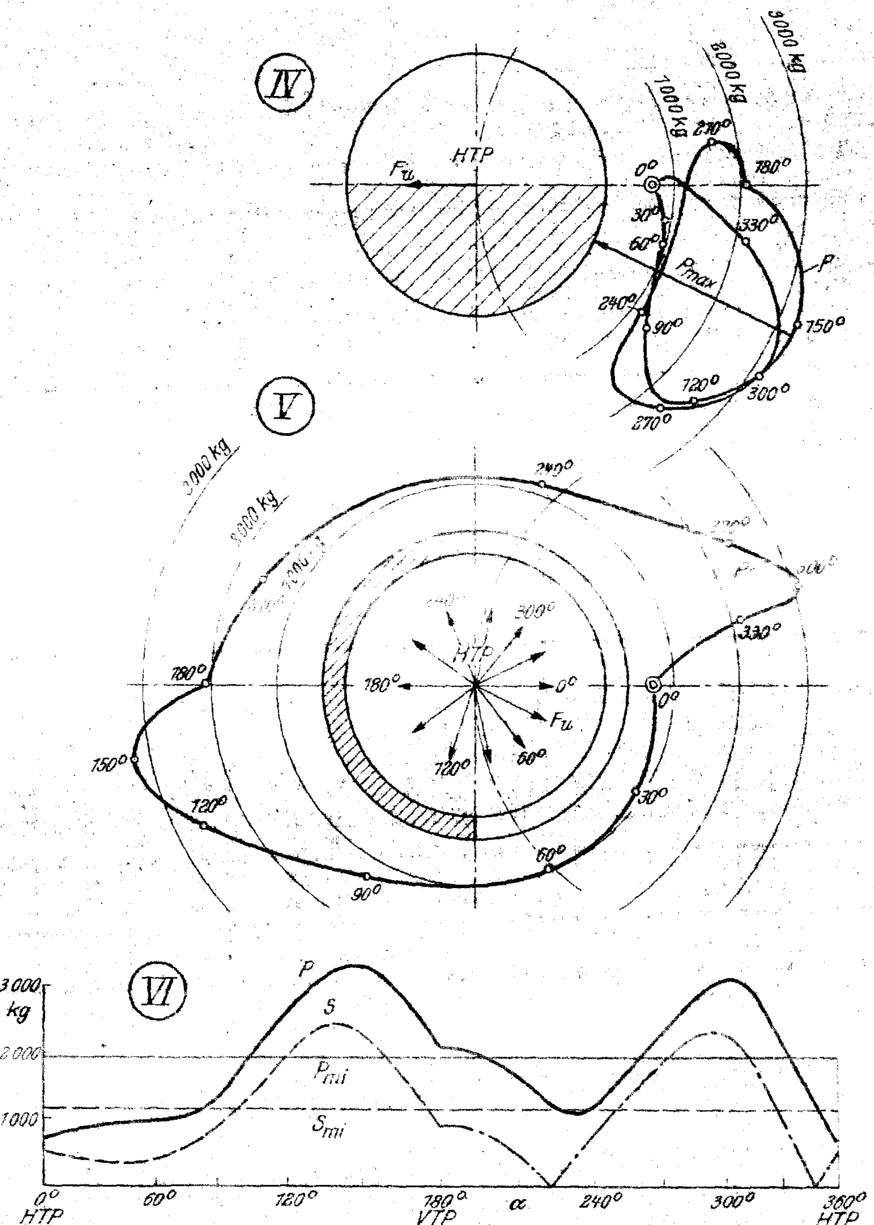


Abb.10 Рис. 10

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

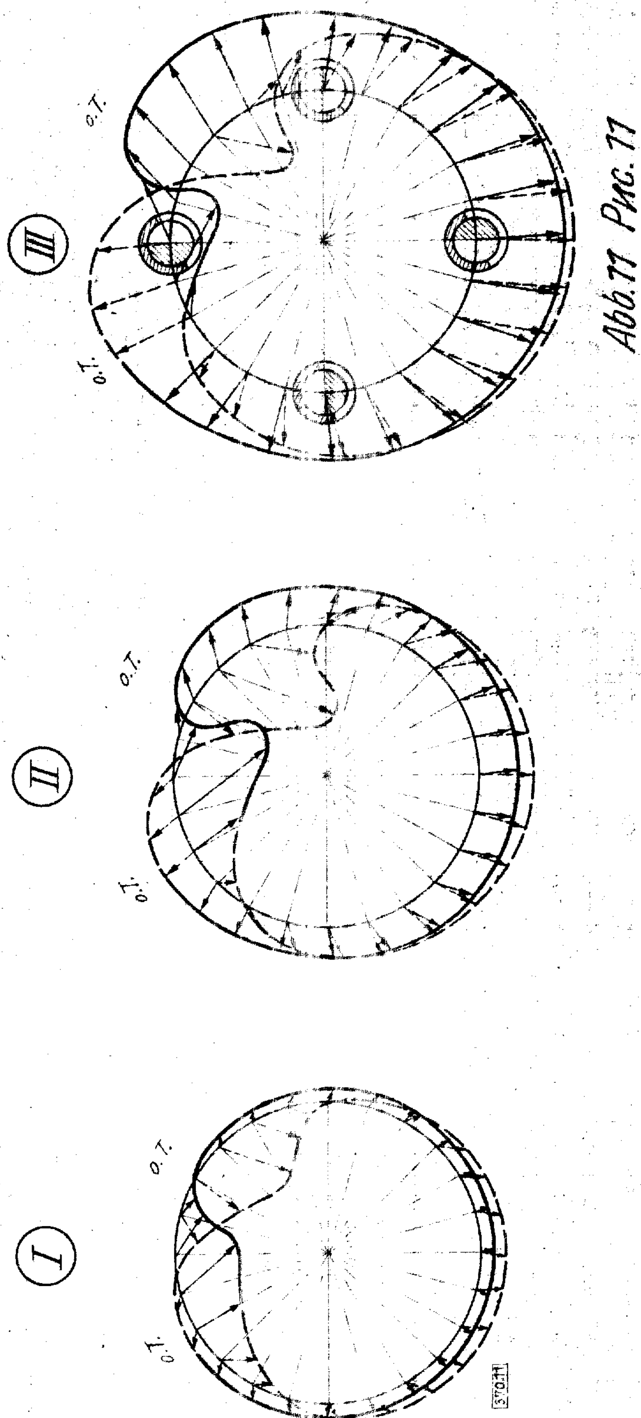
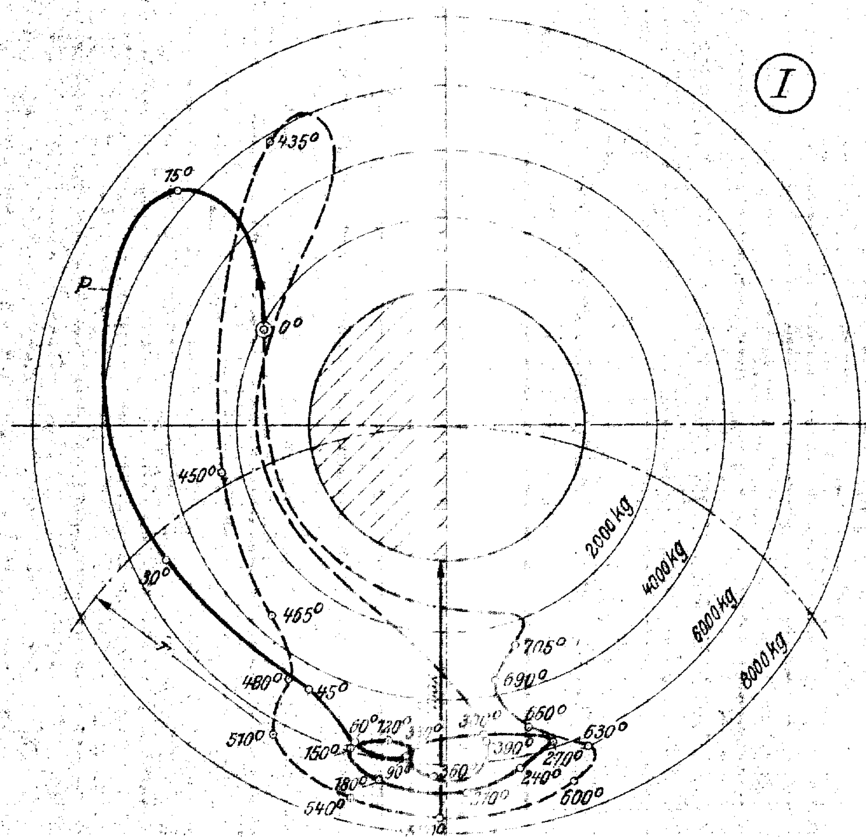


Abb.11 Рис. 11


I
435°
75°
P
0°
450°
2000 kg
4000 kg
6000 kg
8000 kg
30°
465°
705°
690°
480°
45°
650°
630°
60°
120°
300°
510°
150°
390°
270°
240°
90°
360°
180°
540°
600°

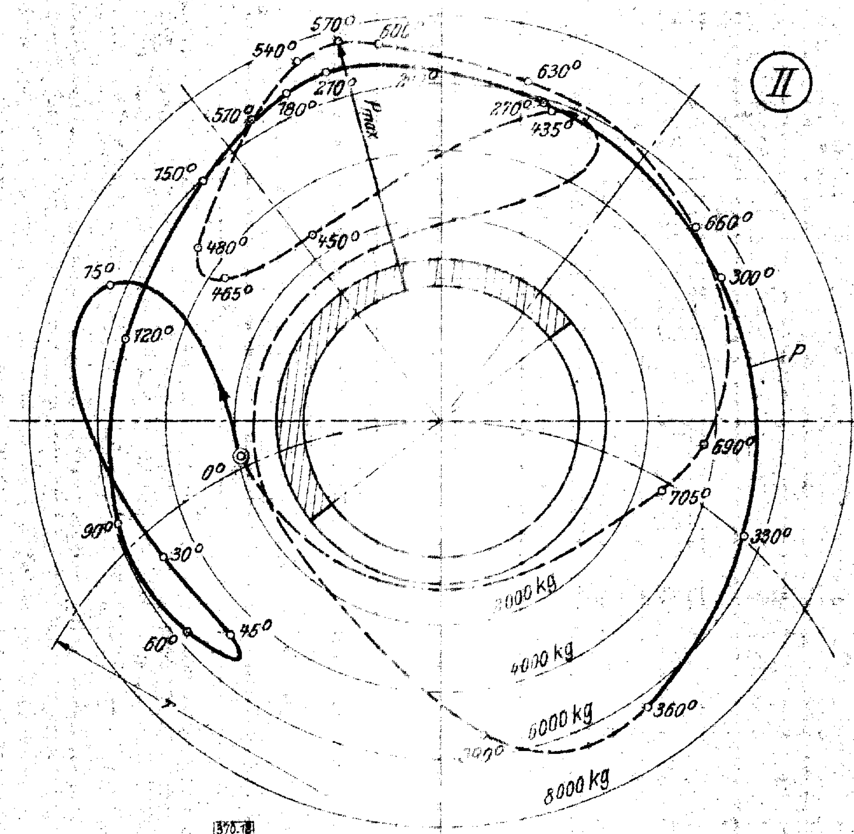

570°
540°
630°
II
270°
180°
510°
270°
435°
P_{max}
750°
480°
450°
465°
660°
75°
300°
120°
P
690°
0°
705°
90°
30°
330°
4000 kg
45°
60°
6000 kg
360°
8000 kg

Abb. 12 Рис. 12

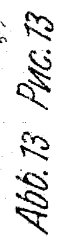
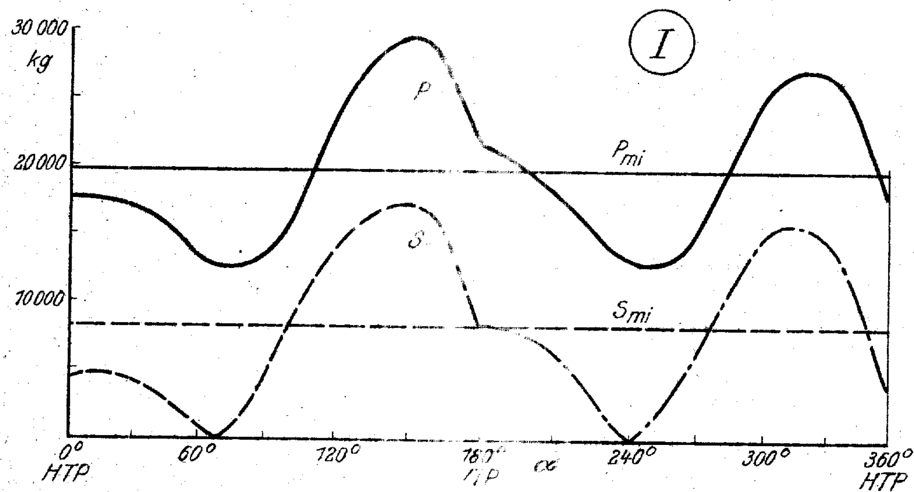


Abb. 13 Рис. 13

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2


30 000
kg
20000
10000
I
P
P_{mi}
S
S_{mi}
0°
HTP
60°
120°
240°
300°
360°
HTP
α

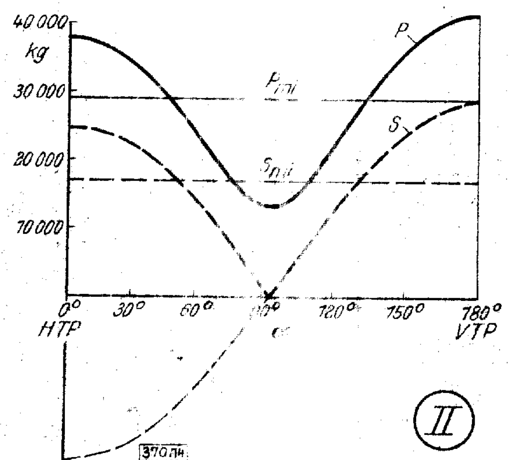

40 000
kg
30 000
20 000
10 000
P
S
0°
HTP
30°
60°
120°
150°
180°
VTP
α
II
370.14

Abb. 14 Рис. 14